



MÁSTER UNIVERSITARIO  
GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS

---

# CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS A TRAVÉS DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES Y ANÁLISIS NUMÉRICOS.

Autor: Javier Pisonero Carabias

Tutor: Dr. Diego González Aguilera

Cotutor: Dr. Luis Javier Sánchez Aparicio

**Trabajo para optar al Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y  
Arquitectura**

Julio de 2020



## Resumen

En el presente trabajo se va a realizar una comparación entre diferentes técnicas sin contacto para determinar las principales características mecánicas de materiales compuestos. Para ello se presentarán las principales características de estos materiales, así como un breve estudio de las diferentes metodologías para centrarse en las utilizadas, que son la correlación digital de imágenes 2D y 3D.

A partir de una campaña de ensayos, se extraerán, con estas técnicas las características mecánicas principales y necesarias del material empleado. Se mostrará el prototipo desarrollado para dicha toma de datos. Posteriormente, alimentándose de estos resultados, se realizará un modelo predictivo numérico, concretamente con la metodología de elementos finitos para dar validez a la metodología empleada y así poder afirmar que su uso en el diseño de un producto es óptimo. Para ello, se creará un modelo diferente por cada resultado obtenido de cada metodología y probeta utilizada. El modelo será una aplicación real de estos materiales.

De esta manera en este trabajo se va a completar una cadena de desarrollo empezando por una campaña experimental, por el análisis de diferentes metodologías para finalmente ser validadas en un modelo numérico predictivo.

**Palabras clave:** Digital Image Correlation (DIC); composite; Finite Element Model (FEM), CFRP.



## ÍNDICE

1.	Introducción.....	13
2.	Objetivos.....	16
3.	Materiales y métodos.....	17
a)	Composite empleado .....	17
b)	Fibra y resina utilizados .....	17
c)	Fabricación del composite .....	18
d)	Máquina de ensayos utilizada .....	19
e)	Caracterización mecánica de materiales a través de métodos fotogramétricos...	19
f)	Fundamentos metodológicos del método de correlación digital de imágenes. ...	24
g)	Patrón Speckle .....	25
	Metodología empleada para la creación del Patrón Speckle artificial.....	28
h)	Sistema de imagen .....	30
	Sistema para 2D-DIC .....	31
	Sistema para DIC 3D.....	34
i)	Calibración de las cámaras .....	34
	Calibración geométrica de la cámara para el método DIC 2D.....	35
	Calibración geométrica de la cámara para el método DIC 3D.....	36
j)	Adquisición de imágenes.....	38
k)	Correlación de imágenes dentro del método DIC-2D.....	39
	Funciones de forma y campos de desplazamiento completos .....	46
	Campos de deformación .....	47
l)	Correlación de imágenes dentro del método DIC3D.....	47
4.	Resultados experimentales .....	49
a)	Fabricación y preparación de probetas .....	49
b)	Configuración de los ensayos .....	50
c)	Post-procesado: aplicación del método de Correlación Digital de Imágenes .....	55
	DIC 2D .....	55
	DIC 3D .....	61
	Corrección sobre el eje z .....	64
5.	Estudio comparativo de resultados .....	70
a)	Análisis de las variables mecánicas obtenidas por DIC-2D y DIC 3D .....	70
b)	Influencia de las discrepancias obtenidas a nivel numérico .....	70



Definición del modelo numérico .....	70
Determinación del criterio de rotura.....	72
Simulación numérica .....	73
c) Discusión de resultados .....	73
6. Conclusiones y perspectivas futuras.....	75
7. Referencias .....	76

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Galga extensiométrica sobre la probeta. Fuente: elaboración propia. ....	14
<b>Figura 2.</b> Estructura de un material compuesto. Fuente: Adaptado de (Lara, Ríos, González, & Belman) .....	17
<b>Figura 3.</b> Proceso de fabricación: a) Dimensiones de las probetas y; b) Probetas resultantes. Fuente: Adaptado de (García-Martin et al., 2020). ....	18
<b>Figura 4.</b> Representación de las diferentes metodologías. a) Interferometría de Moiré; b) Fotoelasticidad; c) Multi-camera tracking; d) PIV y; e) DIC. Fuente: Elaboración propia .....	21
<b>Figura 5.</b> a) Patrón de referencia y; b) patrón tras deformación. Fuente: elaboración propia .....	22
<b>Figura 6.</b> Tipos principales de técnicas DIC. a) Técnica DIC 2D y; b) técnica DIC 3D. Fuente: adaptado de (Blaber, Adair, & Antoniou, 2015) .....	23
<b>Figura 7.</b> Procedimientos de la técnica DIC 2D y la técnica DIC 3D. Fuente: adaptado de (Blaber et al., 2015) .....	25
<b>Figura 8.</b> Patrón Speckle artificial: a) superficie de probeta lisa y; b) Patrón Speckle artificial añadido a la superficie. Fuente: elaboración propia.....	27
<b>Figura 9.</b> Flujo de trabajo de la metodología propuesta para la fabricación de Speckle. Fuente: Elaboración propia.....	29
<b>Figura 10.</b> (a) Malla regular. (b) Resultado de la perturbación de la malla regular. Fuente: Adaptado de (Blaber et al., 2015).....	30
<b>Figura 11.</b> (a) Sistema desarrollado. (b) Divisor de tensiones sobre placa de trabajo y; (c) Esquema unifilar del divisor de tensiones. Fuente: elaboración propia.....	31
<b>Figura 12.</b> Prototipo desarrollado por (Garcia-Martin et al., 2019). ....	32
<b>Figura 13.</b> (a) Traslación fuera del plano del objeto de ensayo. (b) Rotación fuera del plano del objeto de ensayo. (c) variación de la focal de la cámara. (d) Distorsión de las lentes en las medidas del DIC 2D. Fuente: Adaptado de (Blaber et al., 2015). ....	33
<b>Figura 14.</b> Prototipo para el método DIC 3D. Fuente: Elaboración propia.....	34
<b>Figura 15.</b> (a) Panel plano compuesto por 10 columnas y 7 filas de patrones de anillo utilizado para llevar a cabo la calibración de la cámara. (b) Ejemplo de posición utilizada para el panel plano durante el procedimiento de calibración de la cámara. Fuente: Adaptada de (Garcia-Martin et al., 2019).....	36

<b>Figura 16.</b> (a) Placa plana para calibración. (b) Ejemplo de modificación de posición de la placa para calibración. Fuente: elaboración propia. ....	36
<b>Figura 17.</b> Tubo de calibración para el método DIC 3D. Fuente: elaboración propia ..	37
<b>Figura 18.</b> Representación gráfica del método DIC. (a) Evaluación del desplazamiento que sufre un subset. (b) Grados de libertad durante el análisis de desplazamientos. $u$ y $v$ representan la traslación del subconjunto en las direcciones $x$ e $y$ . $du/dy$ y $dv/dx$ representan la deformación cortante del subconjunto en las direcciones $x$ e $y$ . Fuente: adaptada de (García-Martin et al., 2020).....	39
<b>Figura 19.</b> Sistema Quintic b-spline. Fuente: Adaptada de (Blaber et al., 2015).....	42
<b>Figura 20.</b> Representación del proceso Quintic b-spline. Fuente: adaptada de (Blaber et al., 2015).....	43
<b>Figura 21.</b> Ilustración esquemática del principio del algoritmo IC-GN. Fuente: Adaptada de (Blaber et al., 2015).....	44
<b>Figura 22.</b> Direcciones tomadas por el algoritmo RG-DIC. El algoritmo procesa en la dirección del valor $C_{LS}$ (least square correlation error) más bajo. Fuente: Adaptada de (Blaber et al., 2015). ....	45
<b>Figura 23.</b> Errores de sesgo dominantes y errores aleatorios para funciones de forma coincidente y no coincidente. ('- - 'indica que el error de sesgo o error aleatorio puede ser descartado). Para funciones de forma coincidentes (matched) y superpuestas (over-matched), se asume que el error de sesgo puede ser suprimido mediante el uso de métodos de interpolación de intensidad de alto orden o prefiltro Gaussiano de paso bajo. Fuente: adaptada de (Blaber et al., 2015) .....	46
<b>Figura 24.</b> Diagrama de trabajo. Fuente: Elaboración propia .....	49
<b>Figura 25.</b> Patrón Speckle creado impregnado en la probeta. Fuente: elaboración propia .....	49
<b>Figura 26.</b> (a) Disposición de las cámaras. Las cámaras en los extremos son las del método DIC 3D y la central la del método DIC 2D. (b) Disposición de los focos LED para la iluminación correcta de la probeta. Datos capturados durante el ensayo. Fuente: elaboración propia .....	51
<b>Figura 27.</b> Curva probeta CC02 obtenida a través de la célula de carga. Fuente: elaboración propia .....	52
<b>Figura 28.</b> Momentos de disparo durante el ensayo sobre la probeta CC02. Fuente: Elaboración propia.....	53



<b>Figura 29.</b> Curva probeta CC03 obtenida a través de la célula de carga. Fuente: elaboración propia .....	54
<b>Figura 30.</b> Momentos de disparo durante el ensayo sobre la probeta CC03. Fuente: Elaboración propia.....	55
<b>Figura 31.</b> Probetas tras la rotura. Fuente: elaboración propia.....	55
<b>Figura 32.</b> Interfaz Ncorr. Fuente: Elaboración propia .....	56
<b>Figura 33.</b> Región de interés seleccionada. Fuente: elaboración propia .....	57
<b>Figura 34.</b> Interfaz Ncorr tras el análisis DIC. Fuente: Elaboración propia.....	57
<b>Figura 35.</b> Campo de deformaciones sobre la región de interés. Fuente: Elaboración propia .....	58
<b>Figura 36.</b> Colocación de extensómetros virtuales. Fuente: elaboración propia.....	58
<b>Figura 37.</b> (a) Campo de deformaciones sobre la probeta. (b), (c) y (d) Resultados de extensómetro 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: elaboración propia.....	60
<b>Figura 38.</b> a) Campo de deformaciones sobre la probeta. b), c) y d) Resultados de extensómetro 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: Elaboración propia. ....	61
<b>Figura 39.</b> (a) Orden de ejecuciones para poder realizar el procesado DIC 3D; (b) Ventana de selección de archivo. Fuente: elaboración propia.....	62
<b>Figura 40.</b> Parámetros intrínsecos. (a) Antes de la corrección de la distorsión radial; (b) después de la corrección de la distorsión radial. Fuente: elaboración propia.....	63
<b>Figura 41.</b> Representación de los parámetros extrínsecos de la calibración. Fuente: elaboración propia. ....	63
<b>Figura 42.</b> a) Reconstrucción previa a la rotación; b) reconstrucción tras la rotación. Fuente: elaboración propia .....	65
<b>Figura 43.</b> Reconstrucción 3D de las probetas. a) Reconstrucción de la imagen de referencia; b) reconstrucción de la última imagen. Fuente: Elaboración propia. ....	66
<b>Figura 44.</b> Campo de índices de correlación. a) Imagen de referencia b) última imagen del ensayo. Fuente: elaboración propia. ....	67
<b>Figura 45.</b> Campos de desplazamientos en la probeta con MultiDIC. a) Imagen de referencia para desplazamientos en x; b) Campo de desplazamientos en eje x; c) Imagen de referencia para desplazamientos en y; d) Campo de desplazamientos en y; e) Imagen de referencia para desplazamientos en z; f) Campo de desplazamientos en z. Fuente: Elaboración propia.....	68

<b>Figura 46.</b> Resultados de los extensómetros virtuales a partir de la herramienta MultiDIC. a) Probeta CC02; b) probeta CC03. Fuente: Elaboración propia .....	69
<b>Figura 47.</b> a) Geometría del modelo; b) Configuración de carga del modelo; c) Mallado del modelo. Fuente: Elaboración propia.....	72
<b>Figura 48.</b> Resultados del modelo con las características obtenidas por los diferentes métodos DIC; Características obtenidas de a) probeta CC02 por método DIC 2D; b) probeta CC02 por método DIC 3D; c) probeta CC03 por método DIC 2D y; d) probeta CC03 por método DIC 3D. fuente: Elaboración propia. ....	73

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Propiedades mecánicas de la fibra CC 200T-120.....	18
<b>Tabla 2.</b> Propiedades mecánicas de la resina epoxy empleada.....	18
<b>Tabla 3.</b> Especificaciones técnicas de la máquina Servosis ME-405/50/5.....	19
<b>Tabla 4.</b> Ventajas e inconvenientes de las técnicas sin contacto existentes en la actualidad.....	19
<b>Tabla 5.</b> Especificaciones técnicas de la cámara digital réflex Canon EOS 700 D y el sistema macro de lente usado .....	33
<b>Tabla 6.</b> Tres tipos de criterios de correlación utilizados en DIC para poder evaluar el grado de similitud entre el subconjunto de referencia y el subconjunto deformado. $f_i, g_i$ representan el valor de intensidad del punto de pixel dentro del subconjunto de referencia y el subconjunto deformado .....	40
<b>Tabla 7.</b> Configuración del ensayo. ....	50
<b>Tabla 8.</b> Resultados probeta CC02. ....	52
<b>Tabla 9.</b> Resultados probeta CC03 .....	53
<b>Tabla 10.</b> Resultado probeta CC02.....	58
<b>Tabla 11.</b> Resultados probeta CC03 .....	60
<b>Tabla 13.</b> Parámetros intrínsecos de la cámara.....	64
<b>Tabla 14.</b> Resultados obtenidos para probeta CC02.....	68
<b>Tabla 15.</b> Resultados obtenidos para probeta CC03.....	69
<b>Tabla 16.</b> Comparación de las principales características mecánicas obtenidas a través del DIC 2D y del DIC 3D.....	70



## 1. Introducción

Los materiales compuestos se están convirtiendo en una alternativa competente a las soluciones tradicionales basadas en acero para la construcción de diferentes productos, destacando en este aspecto recipientes y tuberías a presión (Sinclair & Helms, 2015);(Laney, 2002). Esto se debe a que este tipo de material puede modificar sus características a través de las condiciones y parámetros de fabricación que se den a estos materiales. No solo esto si no que este tipo de materiales ofrece una resistencia ambiental muy superior, en especial en atmósferas corrosivas (Yahaya, Noor, Othman, Sing, & Din, 2011);(Alamilla, Espinosa-Medina, & Sosa, 2009), un buen comportamiento a fatiga y, sobre todo, una buena relación resistencia-peso. Un material compuesto consiste en la combinación de una matriz y otro material distinto, en forma de fibra. Normalmente, la matriz es una resina epoxy y la fibra puede ser carbono o fibra de vidrio. Existen diferentes fibras, como el kevlar o fibras naturales. No obstante, en fabricación de productos lo más normal es usar polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) o con fibra de vidrio (GFRP). Cabe diferenciar que para este tipo de materiales existen diferentes tipos de fabricación, diferenciando siempre entre procesos con molde abierto y con molde cerrado. Los procesos con molde abierto son:

- Moldeo por colocación manual.
- Filament Winding
- Proceso de autoclave.

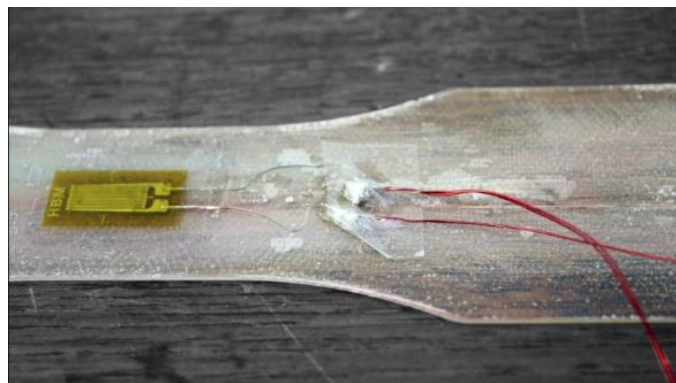
Los procesos con molde cerrado son:

- Sheet Moulding compounds (SMC)
- Inyección
- Pultrusión
- Resin Transfer Moulding (RTM)

A la hora de diseñar un producto, la dificultad usando acero como material empleado no conlleva mucha problemática, ya que el acero es un material isótropo, mantiene las características en las diferentes direcciones, y homogéneo. Pero un material compuesto es totalmente diferente por diversos factores (Rafiee, 2016).;(Colombo & Vergani, 2018). Por ejemplo, la orientación de la fibra o el proceso de fabricación genera una heterogeneidad intrínseca a este tipo de materiales. También, dependiendo del diseño

del propio material cabe la posibilidad de que se obtenga un comportamiento ortótropo o completamente anisótropo (Orell et al., 2018). Debido a toda esta variabilidad de comportamiento el diseño del producto se complica y es necesario el uso de modelos numéricos. Concretamente el método de los elementos finitos (FEM) (T. He, Liu, & Makeev, 2018; Sun & Vaidya, 1996). Este método resuelve un modelo de manera determinista en el que, a través de una serie de inputs, que son las características mecánicas del material, se obtiene el comportamiento del diseño planteado. En este sentido la propia naturaleza del material compuesto complica severamente esta simulación, ya que el número de inputs es muy elevado y los métodos tradicionales, de contacto, para esta determinación de propiedades quedan insuficientes.

En la actualidad, la evaluación del comportamiento mecánico de materiales compuestos se realiza mediante ensayos de laboratorio en probetas con dimensiones normalizadas. Las muestras son sometidas a diferentes esfuerzos, (ej. tracción o compresión) a fin de obtener las constantes mecánicas requeridas para su caracterización. Para la toma de estas medidas directas se emplean elementos como transformadores diferenciales lineales variables (LVDT), transductores láser, extensómetros o galgas extensiométricas (Figura 1).



**Figura 1.** Galga extensiométrica sobre la probeta. Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, la presencia de algunos factores o alteraciones en estos sensores pueden provocar la obtención de resultados erróneos. Entre estas limitaciones destacan: (i) la presencia de fisuras en las probetas o la variación de sus propiedades a lo largo de estos; (ii) las distribuciones de carga deslizantes o desiguales; (iii) la naturaleza local de estas medidas (concretamente las galgas extensiométricas) que no son capaces de caracterizar la respuesta global del material; (iv) así como el carácter invasivo de los sensores empleados, que pueden alterar el comportamiento de los materiales.

Además de las limitaciones anteriormente mencionadas, cabe destacar que en muchos casos el uso de estas medidas directas dificulta la preparación de los ensayos en las probetas. De esta forma pueden encontrarse los siguientes inconvenientes e imprevistos: (i) un coste elevado asociado al uso de instrumentación adecuada (galgas o fibras ópticas); (ii) daño causado a los sensores, ej. galgas extensiométricas dañadas por exceso de temperatura en el entorno; (iii) posicionamiento incorrecto de los sensores, tales como galgas extensiométricas no alineadas con respecto a los ejes de las probetas o; (iv) el carácter local de sus medidas.

Con el fin de evitar estas restricciones, la Comunidad Científica Internacional ha desarrollado diferentes métodos de no-contacto capaces de evaluar las deformaciones sufridas por los materiales a lo largo de toda su extensión. Entre las principales técnicas que son capaces de caracterizar la respuesta global de un material se pueden encontrarla interferometría Moiré (Seif, Khashaba, & Rojas-Oviedo, 2007); el sistema de velocimetría por análisis de imágenes de partículas (PIV); la fotoelasticidad; el multi-camera tracking; y la correlación digital de imágenes (DIC)(Arellano et al., 2010; Chu, Ranson, & Sutton, 1985; Y. He, Makeev, & Shonkwiler, 2012).

En este contexto la correlación digital de imágenes, “Digital Image Correlation” (DIC), supone una buena técnica para la caracterización de estos materiales (Arellano et al., 2010; Caminero, Lopez-Pedrosa, Pinna, & Soutis, 2013; Comer, Katnam, Stanley, & Young, 2013). Existen dos tipos de DIC, 2D y 3D. El proceso DIC 2D, como su propio nombre indica, actúa sobre un plano predeterminado. Este proceso obtiene resultados muy satisfactorios ya que es un método muy estudiado y trabajado, por lo que la validez del método es aceptable (Chu et al., 1985). No obstante, los productos que van a tener como base los materiales compuestos, no suelen tener aplicaciones planas, si no que como se ha podido ver por los procesos de fabricación ya mencionados, las geometrías van a ser complejas, además de diferencias de comportamiento fuera del plano (Sutton, Yan, Tiwari, Schreier, & Orteu, 2008). Por este motivo, la comparación directa entre DIC 2D y 3D se antoja necesaria, para poder comprobar si el proceso 3D puede llegar a unas cotas de precisión similares a las del 2D (Murienne & Nguyen, 2016).

A continuación, en este trabajo se va a realizar una comparativa entre DIC 2D y DIC 3D a modo de validación de ambas tecnologías para poder implementarse en la cadena de diseño.

## 2. Objetivos

El principal objetivo del presente trabajo es la caracterización de una serie de probetas de material compuesto gracias a la metodología de la correlación digital de imágenes (DIC). Para ello se va a utilizar la metodología DIC tanto 2D como 3D. Al utilizarse ambas metodologías se va a realizar también una comparación entre estas metodologías. Con los resultados obtenidos y tal y como se ha comentado en la introducción se va a llevar una simulación numérica en la que se va a intentar dar viabilidad a las metodologías en una aplicación concreta.

**Objetivo general:** Validación de la metodología DIC 2D y 3D a través de ensayos en materiales compuestos y modelos numéricos.

**Objetivos específicos:**

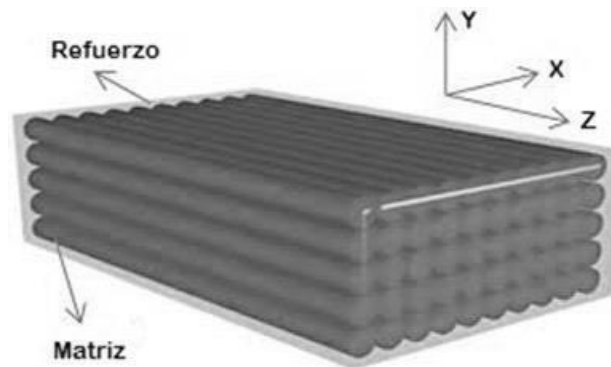
- Comparativa entre metodología DIC 2D y DIC 3D
- Definición precisa de las características mecánicas de materiales compuestos.
- Definición de un modelo numérico para una aplicación en la que el material compuesto pueda destacar.
- Calcular discrepancias a la hora de realizar un diseño mecánico a partir de las metodologías presentadas.



### 3. Materiales y métodos

#### a) Composite empleado

Como ya se ha explicado con anterioridad, un material compuesto es la combinación, normalmente de una fibra con una resina que da lugar a un nuevo material con unas propiedades mejores que los anteriores por separado y con un peso menor. En la Figura 2 puede observarse la estructura general de un composite constituida por: i) una matriz (resina) y; ii) un refuerzo (fibra).



**Figura 2.** Estructura de un material compuesto. Fuente: Adaptado de (Lara, Ríos, González, & Belman)

Existe multitud de combinaciones en la actualidad (Sun & Vaidya, 1996), pero en ingeniería lo más utilizado es usar polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) o con fibra de vidrio (GFRP) (Hai & Mutsuyoshi, 2012; Mokhtari & Nia, 2016; Sharifi et al., 2018). El primero de ellos, los composites tipo CFRP quedan constituidos por una matriz polimérica, generalmente epoxy y una fibra continua con base de carbono. Para el segundo de ellos, los GFRP, la matriz suele ser al igual polimérica epóxica mientras que su fibra es del tipo continua con filamentos cerámicos normalmente basado en dióxido de silicio  $\text{SiO}_2$ .

Atendiendo a lo anteriormente expuesto, y teniendo en consideración el objetivo general y los objetivos específicos previamente mostrados, se optó por fabricar un composite de tipo CFRP, constituido por un total de nueve capas que integran fibra de carbono con resina epoxy.

#### b) Fibra y resina utilizados

La fibra de carbono empleada fue la fibra CC 200 T-120 de la casa comercial Toray®, mientras que la resina, la cual actuará como matriz, fue la CR82 de la casa comercial Sika®. De forma complementaria a ambos productos fue utilizado un para dar el

acabado final, más concretamente el endurecedor CH80-10 de Biresin©. Las características mecánicas tanto de la fibra como de la resina se recogen en la Tabla 1 y en la Tabla 2 respectivamente.

**Tabla 1.** *Propiedades mecánicas de la fibra CC 200T-120*

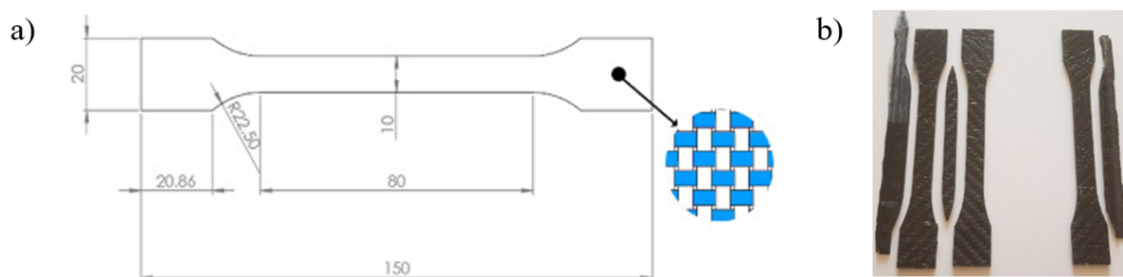
Propiedades mecánicas	Valor
Espesor (mm)	0.32
Densidad (end/cm)	1.76
Ancho (cm)	120 +/-1
Peso (g/m <sup>2</sup> )	200 +/- 5
Peso por bobina (kg)	110
Resistencia a tracción (MPa)	3530
Elongación a la fuerza máxima de tracción (%)	1.5

**Tabla 2.** *Propiedades mecánicas de la resina epoxy empleada*

Propiedades mecánicas	Valor
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.14
Módulo elástico a flexión (MPa)	3600
Modulo elástico a tracción (MPa)	3500
Resistencia a flexión (MPa)	130
Elongación a la máxima fuerza de flexión (%)	4.6
Resistencia a tracción (MPa)	75
Elongación a la máxima fuerza de tracción	3.9
Absorción de agua (%)	0.23

### c) Fabricación del composite

Elegidos los materiales, fibra y resina, se procedió a la fabricación del composite para proceder a su caracterización mecánica bajo la normativa de referencia: la ISO 527:1997 (ISO, 1997a, 1997b), requiriéndose la confección de una probeta de dimensiones normalizadas como la mostrada en la Figura 3.



**Figura 3.** *Proceso de fabricación: a) Dimensiones de las probetas y; b) Probetas resultantes. Fuente: Adaptado de (García-Martin et al., 2020).*

La confección de dichas probetas exigió la superposición de un total de 9 capas con orientaciones de fibra perpendiculares entre sí ( $\pm 90^\circ$ ), constituyéndose de una forma secuencial que siguió el siguiente procedimiento: i) colocación de la fibra con la

orientación correspondiente; ii) impregnación de la fibra en resina y catalizador y; iii) aplicación de presión para evitar posibles defectos en la resina. Una vez colocadas todas las capas, el bloque se cura en un horno de secado a una temperatura de 50°C durante 50 minutos. Resultado de ello fue posible obtener un composite de tipo CFRP con un espesor medio de 2mm apto para la fabricación de recipientes a presión. Una vez obtenido el bloque completo, se fresó con una máquina de control numérico computacional (CNC), obteniéndose un total de 3 probetas.

#### d) Máquina de ensayos utilizada

La máquina de ensayos utilizada ha sido la máquina Servosis ME-405/50/5 cuyas especificaciones técnicas están recogidas en la siguiente tabla.

**Tabla 3.** Especificaciones técnicas de la máquina Servosis ME-405/50/5

Especificaciones técnicas Servosis ME-405/50/5	
Carga máxima	500
Célula de carga	Transductor REP tipo TC50Kn
Agarre	MTS Model XSA304A

#### e) Caracterización mecánica de materiales a través de métodos fotogramétricos

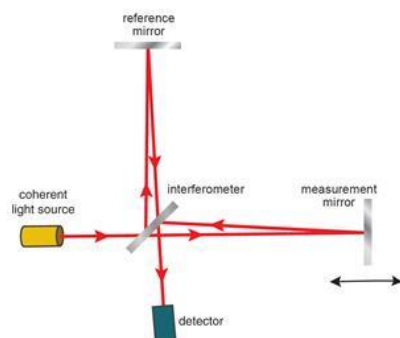
Tal ya como se resaltó en la introducción, la fotogrametría ofrece a día de hoy un amplio abanico de posibilidades capaces de determinar la deformación en materiales desde la Interferometría Moiré(Seif et al., 2007) hasta técnicas como la fotoelasticidad ((Maclaughlin, 1968)), cada una de las cuales posee ventajas e inconvenientes propios (Tabla 4).

**Tabla 4.** Ventajas e inconvenientes de las técnicas sin contacto existentes en la actualidad.

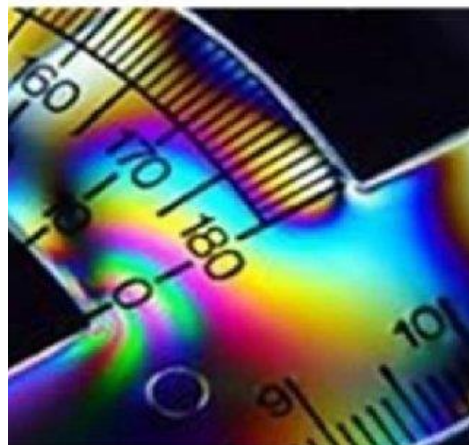
Método	Ventajas	Inconvenientes
Interferometría Moiré	-Sencillez de procesado de datos. -Reducido coste.	-En Moiré geométrico puede ser complejo al requerir de una rejilla. -En Proyección de Franjas, el Moiré necesita una calibración y un desenvolvimiento de fase. -Resultados muy sensibles a la calidad de las imágenes.
Fotoelasticidad	-Equipo relativamente económico. -Fácil implementación. -En reflexión: aplicable a modelos opacos. -En transmisión: aplicable a modelos transparentes.	-Necesidad de polariscopio. -Necesidad de desenvolvimiento de fase (unwrapping).

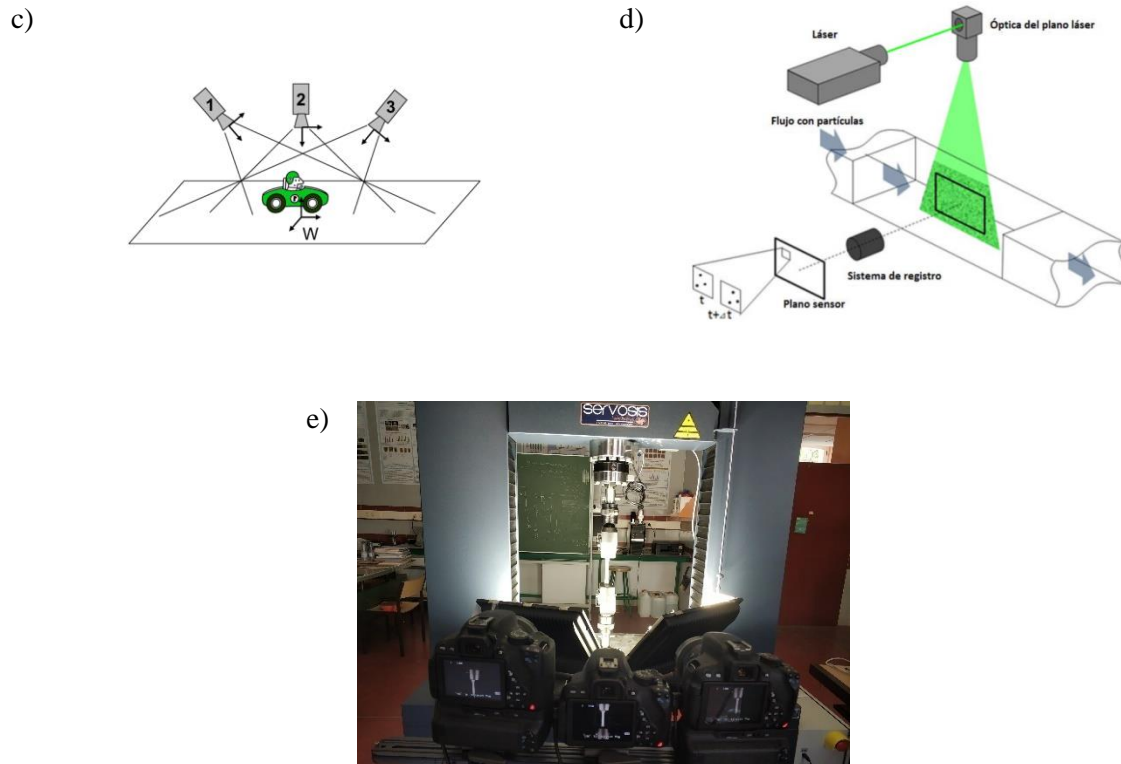
Multi-camera tracking	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Permite resolver problemas de oclusión cuando un objetivo (target) no es visible en una cámara, pero en otra sí.</li> <li>-Permite cubrir un área amplia que con una sola cámara.</li> <li>-Resultados de seguimiento más precisos mediante el uso de múltiples vistas para una identificación mejor del objetivo (target).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Necesidad de resolver el problema de datos asociados donde se determina la correspondencia entre objetivos (targets) en cámaras diferentes.</li> <li>-Coste elevado del sistema de multicámaras con respecto a una sola cámara debido al uso extra de sensores.</li> <li>-Necesidad de situar targets, con formas determinadas, a lo largo del espécimen.</li> </ul>
Sistema de velocimetría por análisis de imágenes de partículas (PIV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Método no intrusivo.</li> <li>-Evita el uso de tubos de Pitot, anemómetros de alambre caliente u otras sondas para mediciones de flujo.</li> <li>-Los marcadores agregados (si se eligen correctamente) apenas causan distorsión del flujo del fluido.</li> <li>-Es capaz de medir secciones transversales bidimensionales completas del campo de flujo simultáneamente.</li> <li>-Los valores de desplazamiento de subpíxeles permiten un alto grado de precisión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-En casos de mayor densidad las partículas no siguen perfectamente el movimiento del fluido.</li> <li>-Imposibilidad de medir componentes a lo largo del eje z (hacia o desde la cámara).</li> <li>-Uso de láseres de clase IV y cámaras con alta resolución y velocidad, restringiendo el coste y la seguridad.</li> </ul>
Correlación digital de imágenes (DIC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fácil preparación de los modelos de estudio.</li> <li>-Rapidez en la obtención de los resultados.</li> <li>-Obtención directa del campo de desplazamientos y deformaciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Necesidad de tener una distribución buena de niveles de grises (patrón Speckle).</li> <li>-Necesidad de calibración del sistema estereoscópico para obtener medidas 3D.</li> <li>-Resultados dependientes de la calidad de las imágenes.</li> </ul>

a)



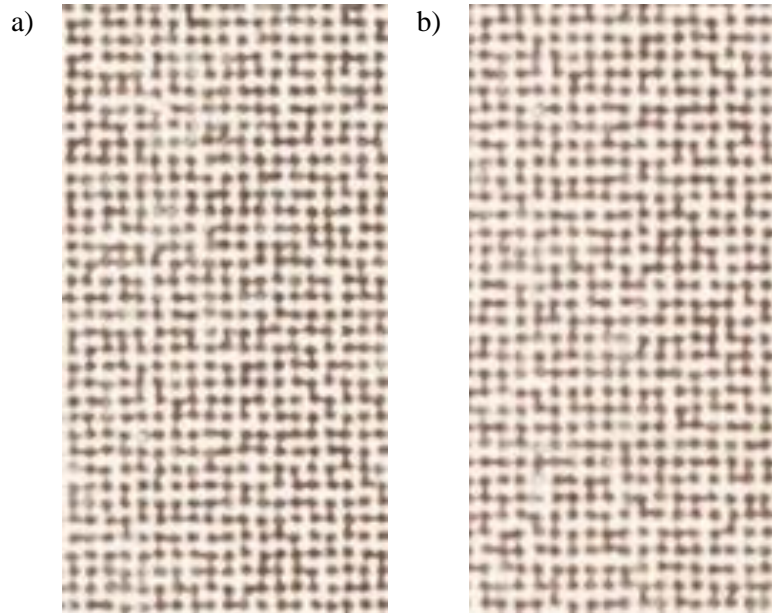
b)





**Figura 4.** Representación de las diferentes metodologías. a) Interferometría de Moiré; b) Fotoelasticidad; c) Multi-camera tracking; d) PIV y; e) DIC. Fuente: Elaboración propia

De entre dicho conjunto de técnicas, el presente trabajo fin de máster ahondará por una de la más versátiles y famosas: la Correlación Digital de Imágenes. Dicho método es una técnica de no contacto óptica que permite obtener mediciones, desplazamientos y deformaciones, a lo largo y ancho de una superficie a través del análisis de la deformación experimentada por un patrón aplicado sobre las probetas ((Dong & Pan, 2017; Pan, Lu, & Xie, 2010; Yao, Meng, Jin, & Yeh, 2005)). Dichas mediciones pueden ser empleadas para la caracterización mecánica del material o incluso para la verificación experimental de prototipos(Garcia-Martin, Bautista-De Castro, Sánchez-Aparicio, Fueyo, & Gonzalez-Aguilera, 2019), situándose sin duda como una de las técnicas fotogramétricas con mayor futuro dentro del campo de la ingeniería mecánica.



**Figura 5.** a) Patrón de referencia y; b) patrón tras deformación. Fuente: elaboración propia

A día de hoy dicho método puede ser aplicado desde dos perspectivas muy diferentes, cada una de las cuales dispone de un conjunto de ventajas e inconvenientes propios; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

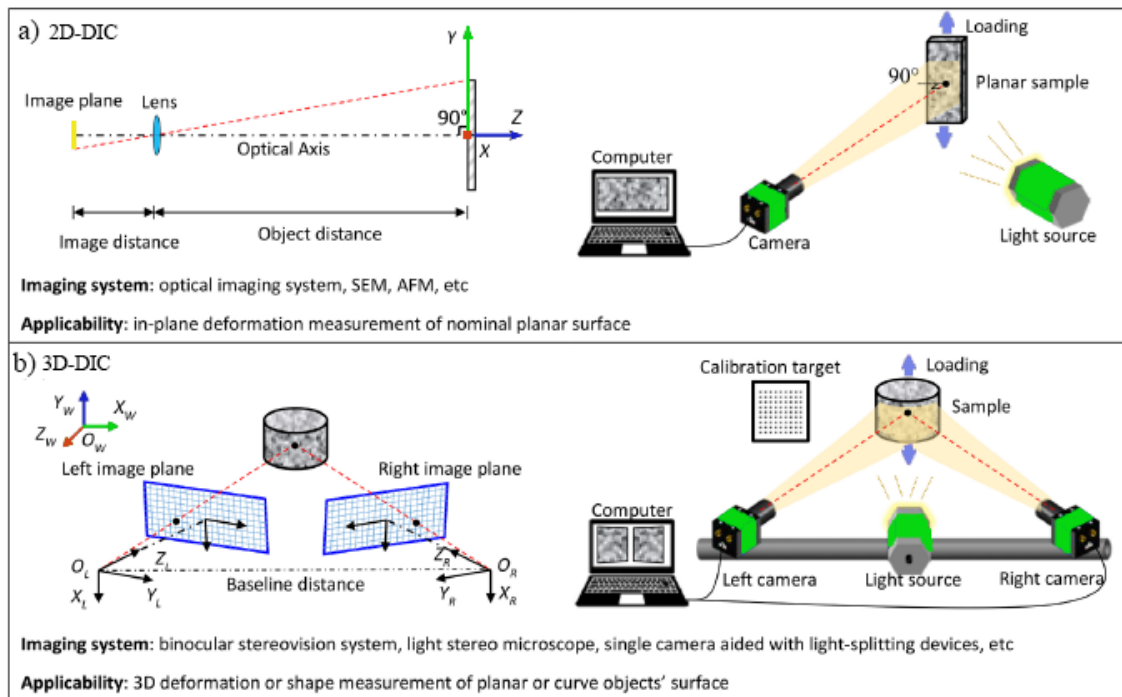
- 1) El método de correlación digital de imágenes en 2 dimensiones (2D-DIC).

Este método utiliza únicamente una cámara fija que limita la medición de las deformaciones al plano nominal del objeto. Para poder obtener mediciones con gran precisión, es necesario cumplir una serie de requisitos sobre la deformación de la muestra, el dispositivo de carga y el sistema de medición que posteriormente se detallarán.

- 2) El método de correlación digital de imágenes en 3 dimensiones (DIC 3D).

Se trata de un método empleado cuando la superficie del objeto de ensayo no es plana o se produce una deformación 3D de un objeto cuando está sometido a una carga. Para llevar a cabo este método se emplean dos cámaras sincronizadas que toman imágenes del material en los mismos estados de deformación. Esta técnica está basada en el principio de estereoscopia y es capaz de obtener con precisión las mediciones de campo completo de las deformaciones y desplazamientos en 3D de superficies planas y curvas.





**Figura 6.** Tipos principales de técnicas DIC. a) Técnica DIC 2D y; b) técnica DIC 3D.  
Fuente: adaptado de (Blaber, Adair, & Antoniou, 2015)

Como es obvio, cada uno de estos enfoques proporciona un conjunto de ventajas sobre el otro y que pasan a detallarse a continuación:

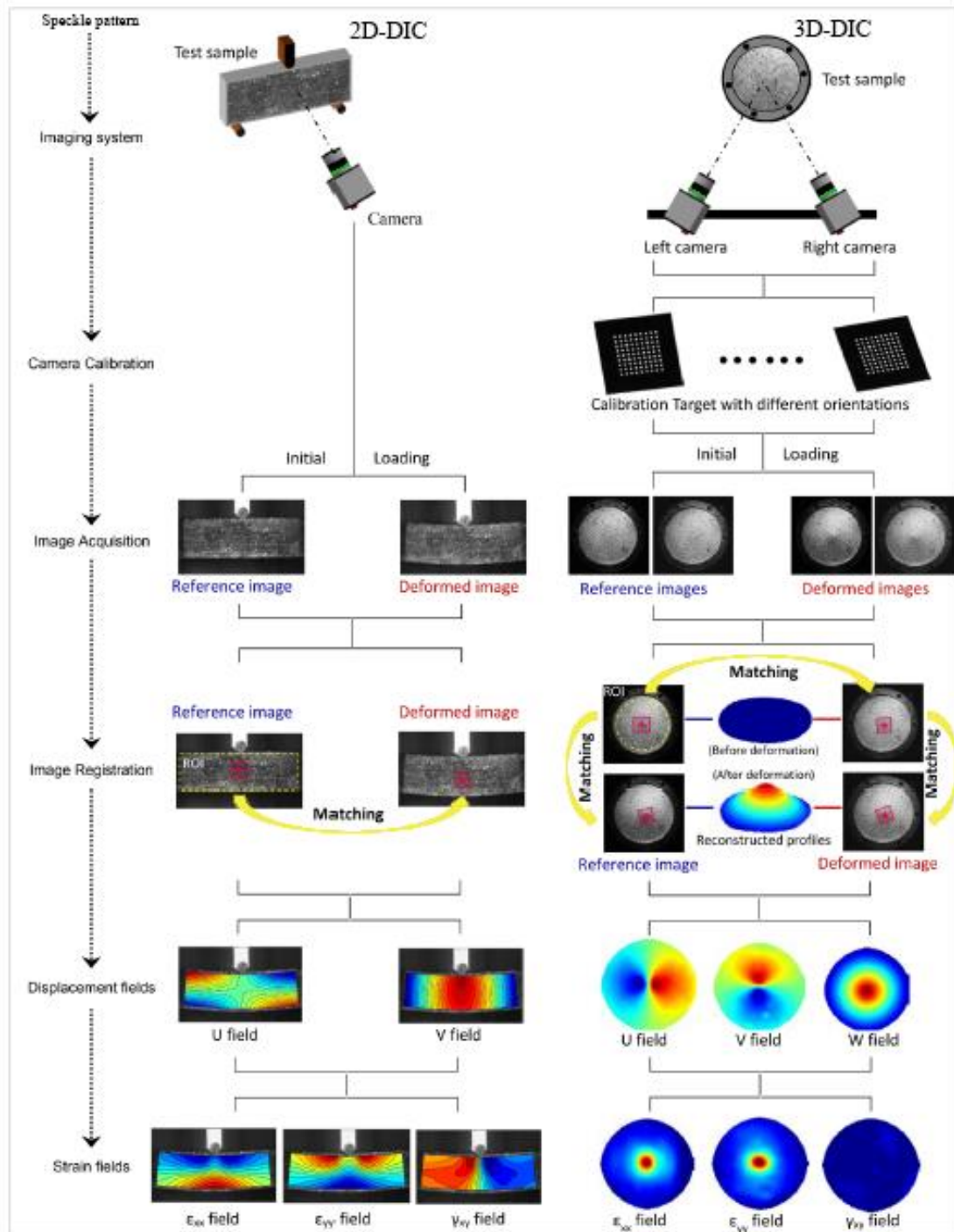
- Ventajas del DIC-2D: Menor necesidad de material para llevar a cabo la metodología. Este método cuenta con un background más sólido, por lo que el método está lo suficientemente desarrollado como para poder tomar los resultados como suficientemente fiables.
- Ventajas del DIC-3D: Posibilidad de reconstruir el material en 3D y obtener un campo de deformaciones más completo que el DIC 2D. Para ciertas aplicaciones las probetas planas no son lo suficientemente fiables por lo que es necesario validar con 3D, esta metodología calcula los campos de desplazamiento y deformación en todo el cuerpo registrado.

Definidos a grandes rasgos ambos métodos, las siguientes secciones procederán a mostrar, en mayor detalle, el flujo de trabajo que ha de llevarse en cada uno de ellos para obtener así el output final: la evolución de las deformaciones de la probeta durante los ensayos mecánicos.

## **f) Fundamentos metodológicos del método de correlación digital de imágenes.**

La determinación de los desplazamientos y las deformaciones producidas en los objetos de ensayo sometidos a diferentes esfuerzos se lleva a cabo en diferentes etapas dentro de la técnica de correlación digital de imágenes. A continuación, en la Figura 7, se sintetiza el proceso paso a paso de cada una de las técnicas DIC, proceso que comienza con la constitución de un patrón Speckle para finalmente obtener los desplazamientos. Dichos procedimientos serán explicados en mayor detalle en las siguientes secciones.





**Figura 7.** Procedimientos de la técnica DIC 2D y la técnica DIC 3D. Fuente: adaptado de (Blaber et al., 2015)

### g) Patrón Speckle

Como en toda aplicación fotogramétrica, los niveles de grises son un factor determinante en la calidad de los resultados finales (especialmente durante las etapas de busque de puntos homólogos). Para el caso de la correlación digital de imágenes existen dos casuísticas bien diferenciadas:

- *Materiales o estructuras con una textura superficial con variaciones de niveles de grises aptas (superficies Speckle naturales):* entre estos patrones de Speckle naturales pueden encontrarse las inclusiones, los límites de grano, aditivos y las fases secundarias para mediciones de microescala en aumentos superiores de microscopía óptica (OM) y en el microscopio electrónico de barrido (SEM) (Omairey, Dunning, & Sriramula, 2018).

*Materiales o estructuras con texturas superficiales lisas*(Figura 8): para este tipo de casuísticas es necesario aplicar un patrón de niveles de grises artificial (superficie Speckle artificial) que asegure una adecuada correlación. Estos patrones emplean enfoques aditivos o sustractivos a través de la proyección de pintura o incluso la impresión de los mismos, dando lugar a las siguientes posibilidades:

1) Patrón diseñado mediante plantillas:

Esta técnica se utiliza para probetas de gran tamaño. Se emplean plantillas para rodar o rociar un patrón de Speckle perfecto. Las plantillas pueden ser realizadas de vinilo fino con agua o mediante corte por láser.

2) Patrón diseñado mediante computadora:

Este método permite una mayor optimización y control del proceso de diseño. Se trata de la técnica seleccionada para la fabricación de los patrones Speckle de las probetas de materiales compuestos, por lo que se desarrollará con mayor profundidad posteriormente.

3) Patrón creado mediante aerosol:

Esta técnica es la más utilizada para crear patrones de Speckle con motas de tamaño medio (décimas de milímetros) en la superficie de las probetas. El procedimiento para obtener este patrón consiste en los siguientes pasos: (i) aplicación de una pintura blanca a la superficie del espécimen; y (ii) sobre la superficie blanca se aplica un aerosol de pintura negra.

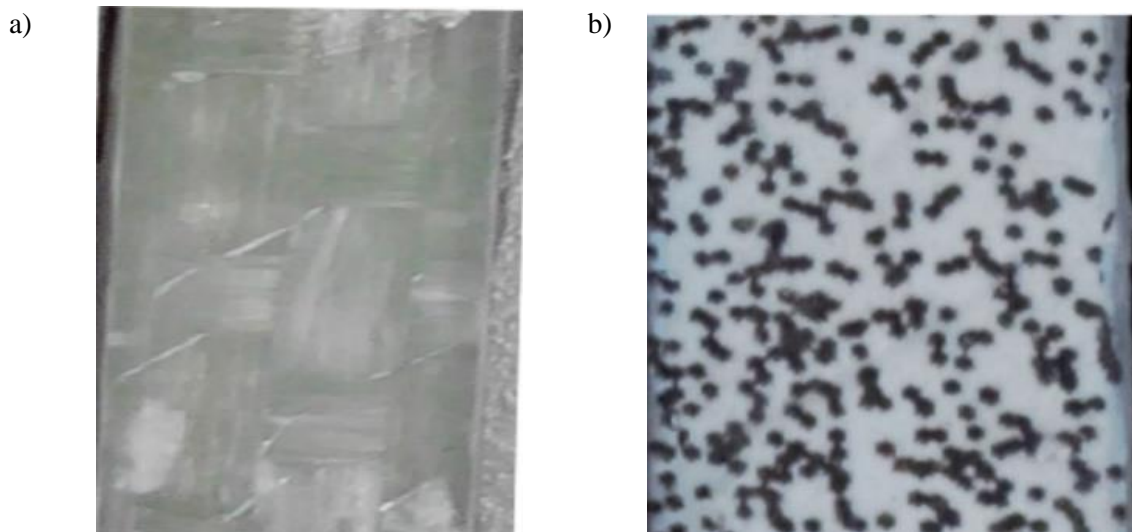
4) Patrón creado mediante tóner:

En este caso el polvo del tóner es inyectado con un soplador pequeño de lentes en la superficie del espécimen que es previamente pintada con pintura blanca (en

el caso de que esta superficie no lo sea). Este método es empleado generalmente para probetas de reducido tamaño (menores de 12 mm).

##### 5) Patrón en escalas reducidas:

En el caso de la fabricación de patrones de Speckle artificiales en longitudes reducidas se utilizan otros métodos como la técnica del haz de iones enfocado (FIB); *spin-coating*; la técnica de aire comprimido; litografía *e-beam*; y remodelación asistida por vapor. Estas técnicas son capaces de crear un patrón de Speckle artificial adecuado desde el punto de vista de micro y nano-escala para mediciones DIC de alta resolución con el SEM.



**Figura 8.** Patrón Speckle artificial: a) superficie de probeta lisa y; b) Patrón Speckle artificial añadido a la superficie. Fuente: elaboración propia

El presente trabajo fin de máster optará, atendiendo a la superficie del material composite fabricado (Figura 3 (b)), por el uso de un patrón Speckle artificial diseñado mediante computadora (Dong & Pan, 2017). Dicha opción permitirá tener un control total sobre los resultados, asegurando así la mayor calidad posible de acuerdo a los siguientes términos:

- **Alto contraste:** con diferentes intensidades de escalas de grises y gradientes de intensidad relativamente grandes.
- **Aleatoriedad:** un patrón no periódico y no repetitivo para facilitar el mapeo de desplazamiento de campo completo.
- **Isotropía:** no hay una direccionalidad obvia en el patrón.

- **Estabilidad:** patrón adherido firmemente a la superficie del objeto que se deforma junto con la superficie de la muestra sin cambios evidentes en la escala de grises y en las características geométricas.

Además de los requisitos anteriormente mencionados, se llevará a cabo una evaluación adicional de la calidad del patrón a través del índice *Mean Intensity Gradient (MIG)* (Ecuación 6). Dicho índice permite evaluar la distribución de niveles de grises, estando directamente relacionado con la precisión final obtenida.

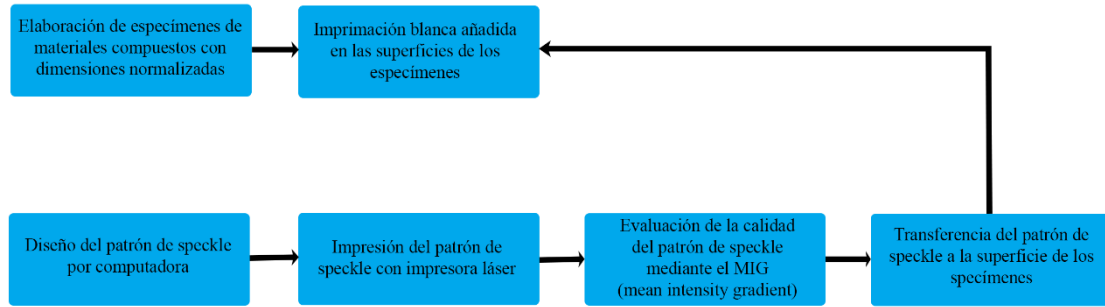
$$MIG = \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H \frac{|\nabla f(x_{ij})|}{W * H} \quad (6)$$

Donde  $|\nabla f(x_{ij})|$  es el vector local de intensidad gradiente de una imagen de escala de grises, W es la anchura de la región de interés (ROI) y H es la altura de la ROI. La región de interés corresponderá a aquella área de la imagen en la cual se obtendrán los desplazamientos.

### Metodología empleada para la creación del Patrón Speckle artificial

Con el fin de optimizar la fabricación del patrón Speckle mediante computadora, el estudio llevado a cabo por Reu et al. (2015) (Reu, 2014a, 2014b, 2015a, 2015b) y por Lecompte et al. (2006) (Lecompte et al., 2006) permite establecer una serie de hipótesis iniciales que garantizan la mayor calidad del patrón. Estos requisitos son los siguientes: (i) aleatoriedad del patrón; (ii) patrón binario; (iii) Speckles circulares; (iv) mismo diámetro; (v) no contacto entre Speckles y; (vi) recubrimiento de Speckles entre el 40-70%, reduciendo al máximo la homogeneidad de regiones.

Teniendo en cuenta las anteriores premisas en lo que respecta al patrón de Specklers, en la Figura 9 se muestra una síntesis del flujo de trabajo para la fabricación de los mismos mediante computadora y su implementación en probetas de materiales compuestos con dimensiones normalizadas. Procedimiento que fue llevado a cabo a través del desarrollo de una script en el software matemático Matlab®.



**Figura 9.** Flujo de trabajo de la metodología propuesta para la fabricación de Speckle.  
Fuente: Elaboración propia

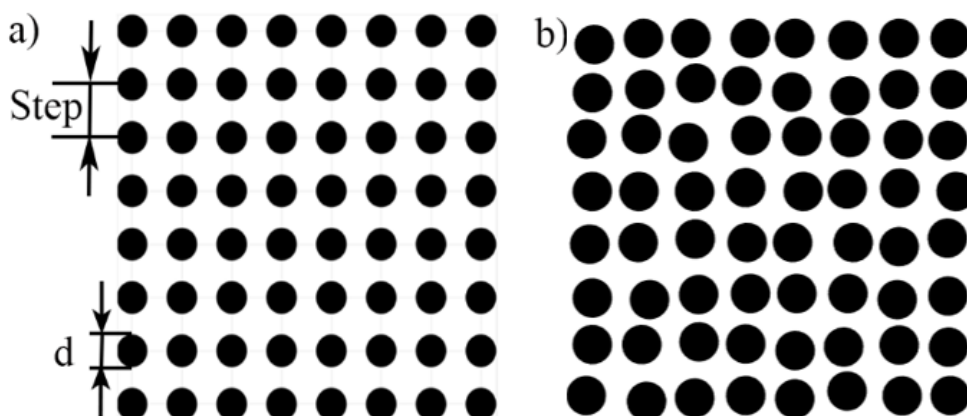
El primer paso para diseñar el patrón mediante computadora consiste en la creación de una malla regular de motas circulares. Los principales parámetros de entrada para generar esta malla regular son el diámetro ( $d$ ) de las motas circulares y la separación ( $step$ ) entre sus centros. El primero de estos parámetros debe tener una dimensión comprendida entre 3-5 píxeles, determinando consigo el GSD (*Ground Sampling Distance*) a emplear durante los ensayos. Este GSD vendrá definido por la focal usada en el sistema de lente, así como las características del sensor de la cámara y la distancia a la probeta.

Una vez generada esta malla regular, es necesario aportar aleatoriedad a las motas circulares. Para ello se utiliza un factor aleatorio ( $rand$ ) con el fin de evitar la generación de un patrón isotrópico con características locales preferenciales.

$$x = x_i \pm rand * \frac{(step - d)}{2} \quad (7)$$

$$y = y_i \pm rand * \frac{(step - d)}{2} \quad (8)$$

Donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas de los centros de las motas circulares obtenidos después de la perturbación del patrón regular,  $x_i$  e  $y_i$  son las coordenadas de los centros de las motas circulares antes de la perturbación,  $rand$  es el factor aleatorio desde 0 a 1, y  $\frac{(step-d)}{2}$  es el grado de libertad de la aleatoriedad con el fin de evitarla superposición de motas circulares.



**Figura 10.** (a) Malla regular. (b) Resultado de la perturbación de la malla regular.  
Fuente: Adaptado de (Blaber et al., 2015).

Una vez se ha diseñado el patrón de Speckle, se imprime en una impresora láser para evaluar su calidad por medio del MIG, tratándose de buscar los valores MIGS más altos posibles. Por último, una vez asegurada la calidad del patrón de Speckle, es transferido a la superficie del espécimen. Para ello, es necesario pintar previamente su superficie con una imprimación elástica blanca que asegurará el máximo contraste posible, para posteriormente transferir el patrón impreso a través del uso de un gel médium. De esta forma, el Speckle generado de color negro quedará superpuesto en la superficie pintada previamente con la imprimación blanca.

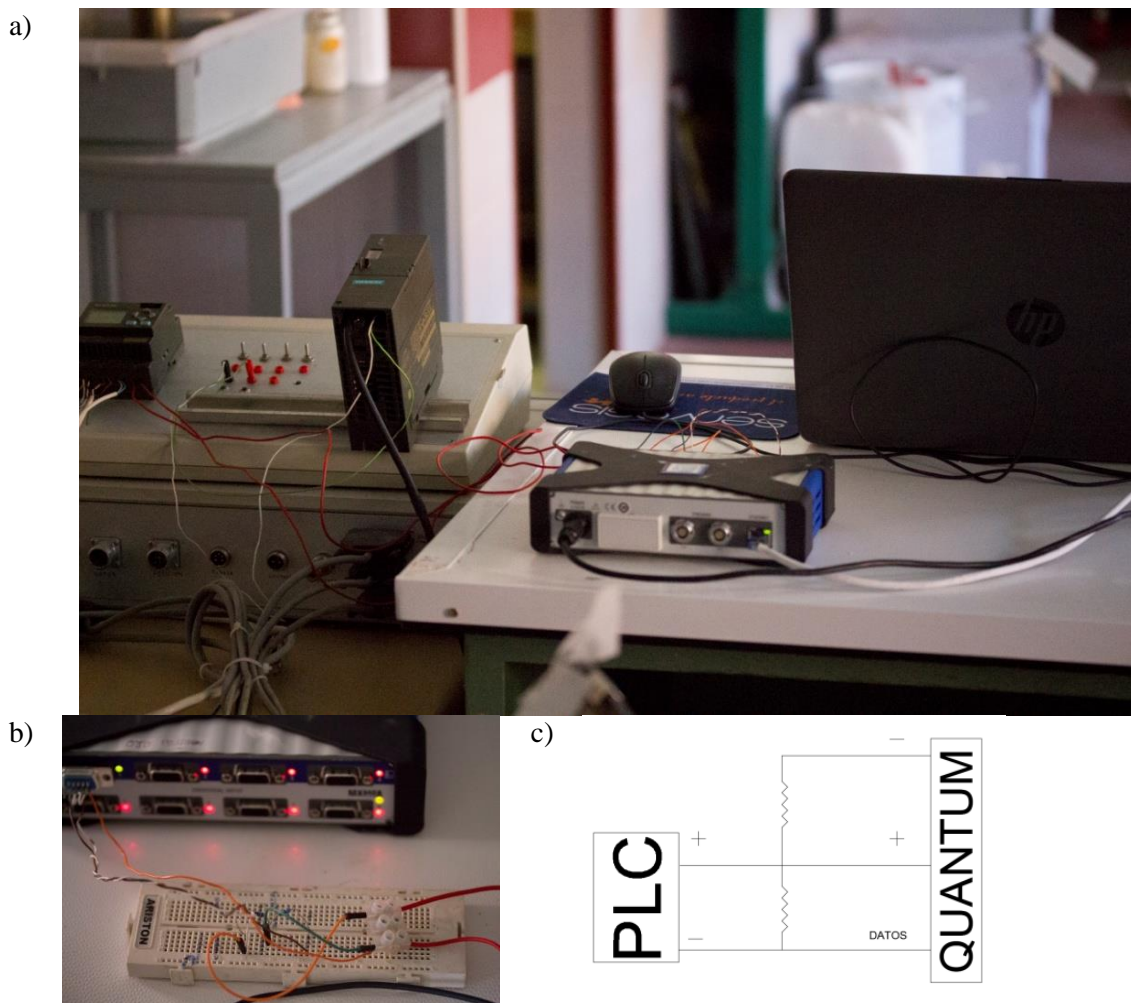
#### h) Sistema de imagen

Para llevar a cabo la técnica de correlación digital de imágenes es necesario disponer de un sistema de adquisición de imágenes que permita el control y la toma de las imágenes digitales a lo largo del ensayo. Teniendo en cuenta las diferencias mencionadas anteriormente entre el método 2D-DIC y el método 3D-DIC, para cada uno de ellos es empleado un sistema de adquisición de imágenes diferente que partirán del prototipo desarrollado por García-Martín et al. (2019)(Garcia-Martin et al., 2019), desarrollándose un nuevo prototipo para la adquisición de datos en 3D en colaboración con el alumno Jorge López-Rebollo.

El sistema como viene siendo comentado consta de un PLC, Siemens LOGO, programado de forma que el PLC manda una señal a las cámaras cada cierto tiempo, determinado por el usuario. Además, cada vez que el PLC manda una señal, a través de un divisor de tensiones, un sistema de adquisición de datos QUANTUM registra esa subida de tensión, que es el momento preciso en el que la cámara genera un disparo. De



esta forma, conectado con la máquina, se tiene un registro en cada momento simultáneo de la carga, el desplazamiento del puente y del estado de la cámara, si ha disparado o no. Por lo tanto, se puede conocer en cada imagen la carga y desplazamiento en ese preciso instante, y ya es la propia imagen con el método DIC correspondiente la que determina la deformación en el campo de la probeta. Con esto además se consigue que las 2 cámaras del método DIC 3D y la cámara del método DIC 2D disparen simultáneamente, por lo que las tres imágenes registradas corresponden al mismo instante. También, destacar que existe un accionado de disparo manual por si se quiere sacar solamente una imagen simultánea.



**Figura 11.** (a) Sistema desarrollado. (b) Divisor de tensiones sobre placa de trabajo y; (c) Esquema unifilar del divisor de tensiones. Fuente: elaboración propia.

### Sistema para 2D-DIC

La técnica 2D-DIC requiere únicamente de una cámara para la toma de imágenes, por lo que está limitada a la medición de deformaciones en el plano de objetos con superficies planas nominales (no siendo posible obtener valores en la coordenada z). Como se dijo

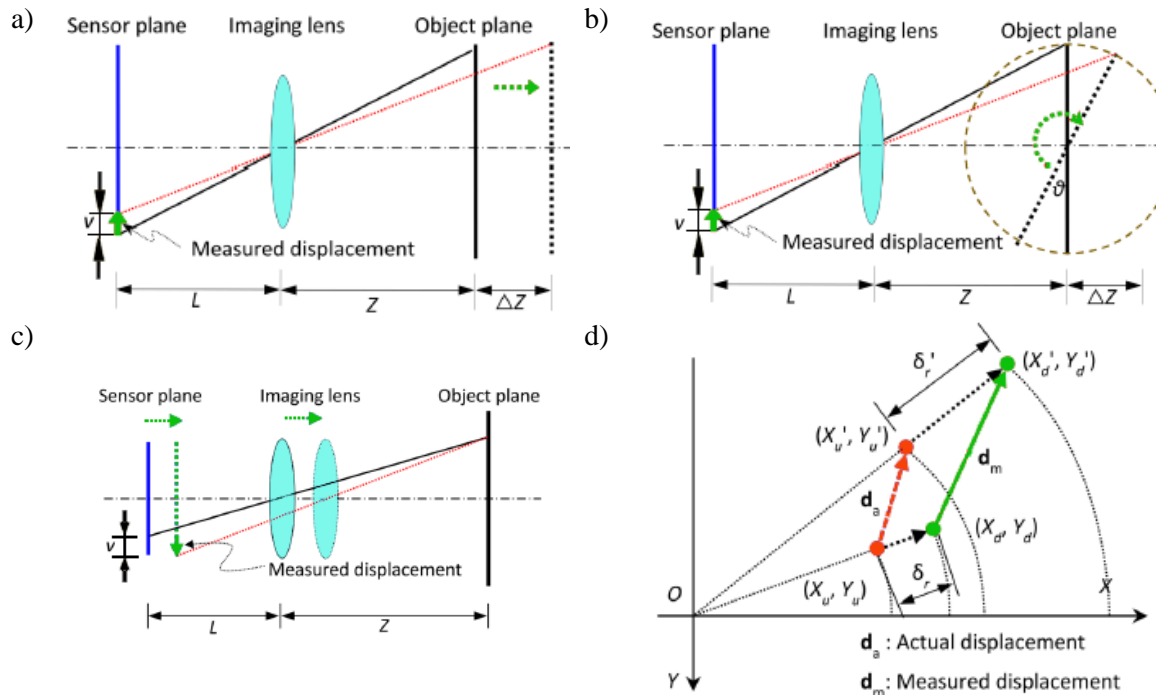
con anterioridad, el prototipo a emplear será el desarrollado por Martín-García et al. (2019). Prototipo que consta de los siguientes componentes: (i) una cámara digital; (ii) un controlador lógico programable (PLC) que permite la conexión de la cámara con la célula de carga de la máquina; y (iii) una unidad de iluminación LED.



**Figura 12.** Prototipo desarrollado por (Garcia-Martin et al., 2019).

La disposición de una sola cámara hace que solo sea posible evaluar las deformaciones experimentadas por el material dentro del plano del sensor (plano de la imagen), no siendo capturados los movimientos fuera del plano. Dicha limitación hace relevante el correcto posicionamiento de la cámara (perpendicular a la probeta) así como la correcta determinación de los parámetros de orientación interna de la misma (focal, punto principal y distorsiones radial y tangencial) (Figura 13).





**Figura 13.** (a) Traslación fuera del plano del objeto de ensayo. (b) Rotación fuera del plano del objeto de ensayo. (c) variación de la focal de la cámara. (d) Distorsión de las lentes en las medidas del DIC 2D. Fuente: Adaptado de (Blaber et al., 2015).

Teniendo en cuenta los factores anteriormente mencionados, tres son las consideraciones a tener en cuenta: (i) el uso de lentes lo más estables (focal fija) y “perfectas” (baja distorsión geométrica y aberración radiométrica) posible; ii) el uso de focales largas y; iii) el posicionamiento ortogonal de la cámara con respecto a la probeta (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Para dichas consideraciones los sistemas de lentes bilaterales telecéntricos se sitúan como los mejor posicionados. Sin embargo, su amplio coste puede limitar su uso. En contraposición a ello se propone el uso de lentes macro de focal fija con un valor de 60 mm (objetivo normales) junto a una cámara DLRS Canon 700D.

**Tabla 5.** Especificaciones técnicas de la cámara digital réflex Canon EOS 700 D y el sistema macro de lente usado

Tipo de sensor	CMOS APS-C
Tamaño de sensor	22.3 x 14.9 mm <sup>2</sup>
Factor de recorte	1.61
Tamaño de pixel	4.3μm
Tamaño de la imagen	5184 x 3456 px
Píxeles totales	18.5 Mpx
Focal	60 mm
Distancia focal más cercana	254 mm
Aumento de la lente	1:1 (tamaño real)
Dimensiones	133.1 x 99.8 x 78.8 mm

### Sistema para DIC 3D

En el caso del DIC 3D, es necesario emplear al menos dos cámaras digitales para obtener una reconstrucción 3D de forma precisa. Para ello, se lleva a cabo una modificación del prototipo anteriormente mostrado, incorporando una cámara adicional debidamente sincronizada.



*Figura 14. Prototipo para el método DIC 3D. Fuente: Elaboración propia*

#### i) Calibración de las cámaras

Las imágenes capturadas por sensores ópticos sufren distorsión de lentes que afectan negativamente a la precisión de los resultados obtenidos tras la aplicación del método de correlación digital de imágenes. Las distorsiones tangenciales y radiales generadas por el sistema de lentes pueden ser reducidas o eliminadas. Para ello es necesario llevar a cabo un proceso de calibración del sistema de adquisición de imágenes.

Este procedimiento de calibración proporciona una serie de parámetros de salida que pueden dividirse en dos tipos: (i) los parámetros intrínsecos (punto central, coeficientes

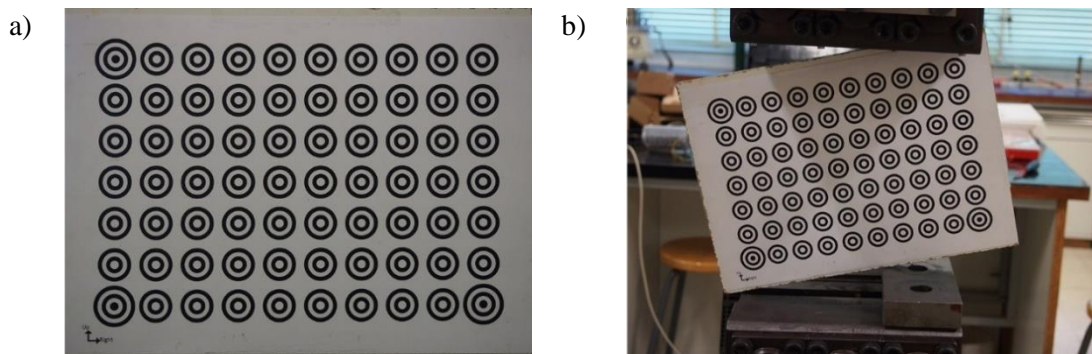
de las distorsiones tangenciales y radiales de las lentes y longitud focal de cada cámara); y (ii) los parámetros extrínsecos (por ejemplo, translación y rotación entre las dos cámaras).

Los procedimientos para llevar a cabo la calibración de una cámara se pueden clasificar en dos categorías: (i) calibración en laboratorio (Zhang, 2000); y (ii) auto-calibración (Fraser, 1997). Esta segunda categoría es la más utilizada al permitir obtener los parámetros de distorsión de la cámara durante el propio ensayo, es decir, con los valores reales (ha de tenerse en cuenta que el primer método calibra cámaras en condiciones de laboratorio, pero las diferencias de temperatura o el movimiento no deseado del sistema de lentes pueden provocar ligeras variaciones). También es posible optar por una calibración de laboratorio en el momento del ensayo, requiriendo en este caso mallas de calibración de tamaño adecuado. Con el fin de asegurar una calibración fiable de la cámara es necesario un número elevado de posiciones (mínimo 15 posiciones).

### **Calibración geométrica de la cámara para el método DIC 2D.**

Considerando las anteriores premisas, el método de calibración para el sistema de adquisición de imágenes DIC 2D consiste en la calibración de los parámetros intrínsecos de la cámara (Vo, Wang, Luu, & Ma, 2011). Este proceso consta de las siguientes etapas:

- 1) Detección de los puntos de control en las imágenes sin procesar mediante el uso del método de detección de ejes y ajuste de elipses.
- 2) Optimización de los parámetros intrínsecos de la cámara y coordenadas globales de los puntos de control mediante el uso del algoritmo Levenberg-Marquardt.
- 3) Extracción de las imágenes frontales y uso de las posiciones calculadas de los puntos de control como una aproximación inicial con el fin de refinar las posiciones para el proceso posterior en el método de correlación digital de imágenes (interpolación subpíxel y optimización no lineal).
- 4) La proyección inversa de los puntos de control detectados en las imágenes frontales de nuevo a las imágenes sin procesar.
- 5) Refinamiento de los parámetros de la cámara junto con las coordenadas globales de los puntos de control.

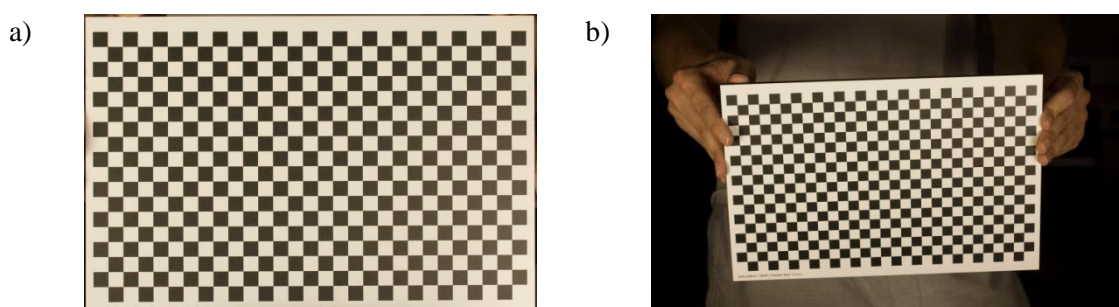


**Figura 15.** (a) Panel plano compuesto por 10 columnas y 7 filas de patrones de anillo utilizado para llevar a cabo la calibración de la cámara. (b) Ejemplo de posición utilizada para el panel plano durante el procedimiento de calibración de la cámara. Fuente: Adaptada de (Garcia-Martin et al., 2019)

### Calibración geométrica de la cámara para el método DIC 3D.

La calibración de las dos cámaras que constituyen el sistema de adquisición de imágenes para el método 3D-DIC es de suma importancia, ya que determina directamente la reconstrucción de las imágenes 3D de forma precisa (Xiao, Liang, Yu, Tang, & Asundi, 2010). El proceso de calibración en este tipo de DIC ha de determinar: (i) la orientación interior de las dos cámaras (las coordenadas del punto principal  $X_0$ ,  $Y_0$ , la distancia principal  $f_y$  y los parámetros de las distorsiones de las lentes); y (ii) la orientación relativa entre las dos cámaras (matriz de rotación  $R$  y matriz de translación  $T$ ).

Dicho proceso de calibración puede ser efectuado a través del método anteriormente descrito. Durante este proceso de calibración, las dos cámaras han de capturar un objetivo plano desde diferentes posiciones para poder obtener una calibración fiable, además de un tubo con un papel de calibración que sirve para definir las coordenadas.



**Figura 16.** (a) Placa plana para calibración. (b) Ejemplo de modificación de posición de la placa para calibración. Fuente: elaboración propia.



**Figura 17.** *Tubo de calibración para el método DIC 3D. Fuente: elaboración propia*

Utilizando la técnica de ajuste del haz (*bundle adjustment technique*) y *direct linear transformation* (DLT), es posible obtener una orientación precisa de las cámaras así como una calibración fiable. . Con el fin de alcanzar una elevada precisión en la calibración de las dos cámaras se utiliza un modelo más complejo de distorsión de lentes de 10 parámetros en el algoritmo de calibración. En el caso del DIC 3D lo primero que se debe realizar es calcular los parámetros intrínsecos de las cámaras para que la distorsión y el sesgo de la lente puedan ser amortiguados. Esto se realiza con el algoritmo BA que obtiene estos parámetros mediante las observaciones repetitivas en diferentes direcciones como se ha explicado anteriormente. Los parámetros se obtienen a partir de la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde  $s$  es el sesgo comentado,  $f_x$  y  $f_y$  son las distintas focales en píxeles.  $C_x$  y  $C_y$  son coordenadas del centro óptico. A partir de aquí el algoritmo corrige la distorsión con un modelo de distorsión no lineal reemplazando las coordenadas por las corregidas de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{bmatrix} \quad (10)$$



Donde:

$$\left. \begin{array}{l} r^2 = x^2 + y^2 \\ k_1, k_2 \text{ y } k_3 \end{array} \right\} \text{son los parámetros de distorsión radial.}$$

$p_1$  y  $p_2$  son los parámetros de distorsión tangencial.

En este aspecto se habla de una calibración estéreo. Para ello se aplica la DLT para que exista una relación directa entre las coordenadas de la imagen y las coordenadas del objeto. Esto se utiliza gracias a que 11 parámetros matemáticos lineales se convierten en 9 parámetros de un modelo no lineal. De estos 9 tres son para orientación interna y el resto para externa. Esto ocurre gracias a que se obtienen dos ecuaciones a partir de cada punto. A mayor número de puntos para esta calibración, mayor precisión. Esto se obtiene a través de capturar una imagen de un objeto de calibración que no sea plano como en la Figura 17, esto permite unificar cada par de imágenes en un mismo sistema de coordenadas. Para todo esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\ y_p &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \end{aligned} \quad (11)$$

Donde  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9, L_{10}$  y  $L_{11}$  son los parámetros de la DLT.

### j) Adquisición de imágenes

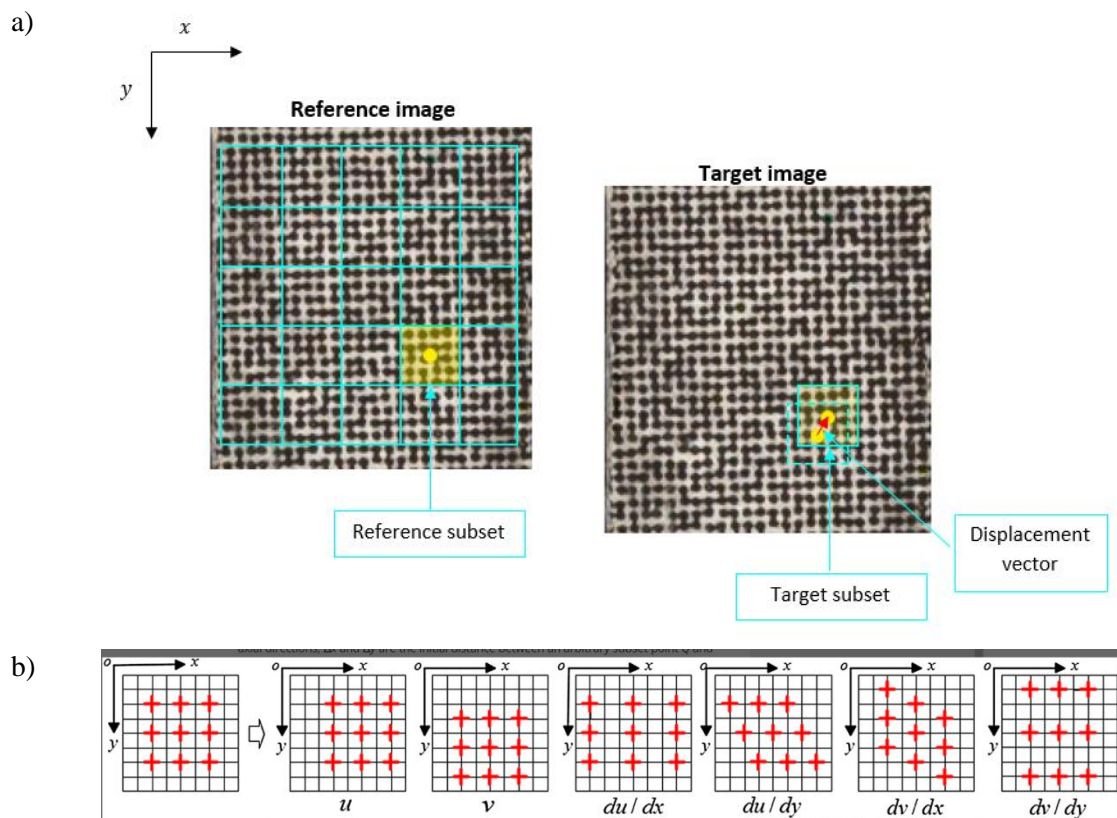
Una vez obtenidos los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara/s, se procede a la captura de las imágenes digitales en diferentes intervalos de tiempo. Imágenes que posteriormente serán corregidas de distorsión al disponerse de los parámetros intrínsecos de la cámara, así como colocadas en el espacio, para el caso de la correlación en 3D, gracias a los parámetros tanto intrínsecos como extrínsecos y a través de un ajuste de haces complementado por la DLT.

El proceso de captura de imágenes comienza con la adquisición de un set de imágenes de referencia (probeta no deformada) y otro conjunto de imágenes de la probeta deformada a diferentes estadios de carga. Una vez las imágenes han sido capturadas, son almacenadas en un ordenador para su posterior procesado. Cabe mencionar que la frecuencia con la que son adquiridas estas imágenes está relacionada con una serie de intervalos de carga considerados en la máquina de ensayos de tracción o compresión. Para ello, las cámaras se han sincronizado previamente con la placa de carga a través del PLC.

Las imágenes serán capturadas en formato .RAW, correctamente enfocadas y con un tiempo de exposición adecuado para evitar cualquier trepidación. La captura en formato. RAW permitirá un posterior revelado digital, permitiendo un control profundo de los parámetros de la imagen como son la exposición, el contraste o el balance de blancos.

### k) Correlación de imágenes dentro del método DIC-2D

Una vez han sido adquiridas las imágenes de la probeta antes (probeta sin deformar) y durante el ensayo (probeta deformada), se procede a comparar las mismas para poder extraer los desplazamientos y deformaciones experimentados por el material (Blaber et al., 2015). Para tal fin el método de correlación digital de imagen, bien en 2D o en 3D, divide la imagen en una serie de regiones cuadradas (denominadas sub-sets) las cuales son comparadas entre dos imágenes consecutivas. Dicha comparación permite obtener la deformación y el desplazamiento experimentado por cada una de estas regiones (Figura 18). Dicho procedimiento de comparación solo se llevará a cabo en aquella región de interés (la cual dispone de un Spekle adecuado), pasándose a denominar ROI.



**Figura 18.** Representación gráfica del método DIC. (a) Evaluación del desplazamiento que sufre un subset. (b) Grados de libertad durante el análisis de desplazamientos.  $u$  y  $v$  representan la traslación del subconjunto en las direcciones  $x$  e  $y$ .  $du/dy$  y  $dv/dx$  representan la deformación cortante del subconjunto en las direcciones  $x$  e  $y$ . Fuente: adaptada de (García-Martin et al., 2020)

El cálculo de los desplazamientos y deformaciones experimentados por cada subset entre dos imágenes consecutivas (imagen  $i$  e  $i+1$ ) comienza por determinar el centroide del mismo en la imagen  $i+1$ . Para tal fin se utiliza un coeficiente de correlación que permite determinar el subset de la imagen  $i+1$  que se asemeja más al subset de la imagen  $i$ . De acuerdo con la literatura (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009; Sutton, Orteu, & Schreier, 2009), existen cuatro tipos de criterios de correlación: (i) el criterio de correlación cruzada (CC); (ii) el criterio de la suma de las diferencias absolutas (SAD); (iii) el criterio de la suma de las diferencias cuadradas (SSD); y (iv) el criterio de la suma paramétrica de las diferencias cuadradas (PSSD). Criterios dentro de los cuales podemos encontrar otros tres subcriterios (Tabla 6): (i) el criterio ZNCC (*zero-mean normalized cross-correlation*); (ii) el criterio ZNSSD (*zero-mean normalized sum of squared difference*); y (iii) el criterio PSSD<sub>ab</sub> (*parametric sum of squared difference*). Estos criterios son insensibles a la escala potencial y a los cambios de compensación de la intensidad del subconjunto deformado. A continuación, se muestran las definiciones matemáticas de estos criterios y sus funciones.

**Tabla 6.** Tres tipos de criterios de correlación utilizados en DIC para poder evaluar el grado de similitud entre el subconjunto de referencia y el subconjunto deformado.  $f_i$ ,  $g_i$  representan el valor de intensidad del punto de pixel dentro del subconjunto de referencia y el subconjunto deformado

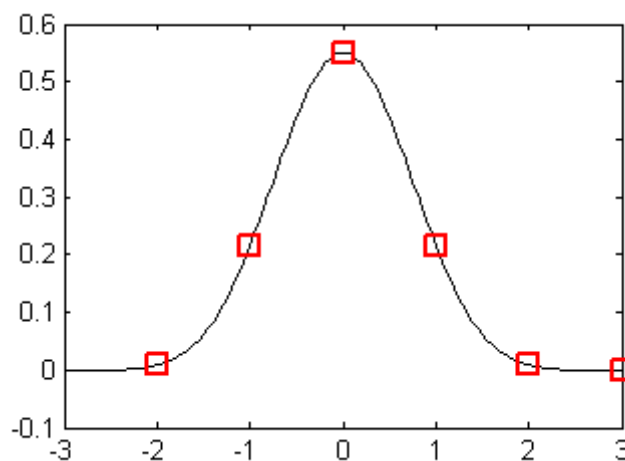
Función	Criterio CC	Criterio SSD	Criterio PSSD
Sensible a todos los cambios de la intensidad del subconjunto deformado	$C_{CC} = \sum f_i g_i$	$C_{SSD} = \sum (f_i - g_i)^2$	-
Insensible a los cambios de desplazamiento de la intensidad del subconjunto deformado	$C_{ZCC} = \sum (\bar{f}_i, \bar{g}_i)$	$C_{ZSSD} = \sum [\bar{f}_i - \bar{g}_i]^2$	$C_{PSSDab} = \sum (f_i + b - g_i)^2$
Insensible a los cambios de escala de la intensidad del subconjunto deformado	$C_{NCC} = \frac{\sum f_i g_i}{\sqrt{\sum f_i^2 \sum g_i^2}}$	$C_{NSSD} = \sum \left( \frac{f_i}{\sqrt{\sum f_i^2}} - \frac{g_i}{\sqrt{\sum g_i^2}} \right)^2$	$C_{PSSDa} = \sum (a f_i - g_i)^2$
Insensible a los cambios de escala y desplazamiento de la intensidad del subconjunto deformado	$C_{ZNCC} = \frac{\sum \bar{f}_i \bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2 \sum \bar{g}_i^2}}$	$C_{ZNSSD} = \sum \left( \frac{\bar{f}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2}} - \frac{\bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{g}_i^2}} \right)^2 = 2(1 - C_{ZNCC})$	$C_{PSSDab} = \sum (A f_i + b - g_i)^2 = \sum \bar{g}_i^2 (1 - C_{ZNCC})$



Atendiendo a la descripción matemática anteriormente expuesta, el centroide del subconjunto  $i+1$  será aquel punto que provoque un máximo en la función de correlación. Por lo tanto, la diferencia en las posiciones del centro del subconjunto de referencia y el deformado da lugar al vector de desplazamiento en el punto A.

Llegados a este punto es posible determinar, con un pixel de precisión, el vector de desplazamiento de los subconjuntos para el estado  $i$  e  $i+1$ . A fin de lograr precisiones sub-píxel, la correlación digital de imágenes emplea métodos de interpolación de niveles de grises basados en b-splines junto a algoritmos de optimización que permitan obtener otra vez el valor “extremum” del coeficiente de correlación, pero ahora a nivel sub-píxel. Dentro de la variedad de sistemas de interpolación b-spline (Cubic b-spline, Quartic b-spline, etc.), el sistema Quintic b-spline es el más preciso, permitiendo pasar de valores discretos (en cada píxel) a funciones continuas. Esto se lleva a cabo tomando una serie de productos de puntos con las columnas de la matriz de coeficientes b-spline y el núcleo b-spline, y luego tomando un único producto de puntos en la fila resultante de valores interpolados. El primer paso es la interpolación de la cuadrícula 2D b-spline para obtener los valores del coeficiente 1D b-spline. El segundo paso sería la interpolación del valor de escala de grises de estos valores del coeficiente 1D b-spline. Los pasos de obtención de los coeficientes b-spline serían los siguientes.

1. Hacer una copia de la matriz de la escala de grises y rellenarla. Posteriormente muestrear el núcleo b-spline en -2, -1, 0, 1, 2 y 3 como se muestra en la Figura 19.



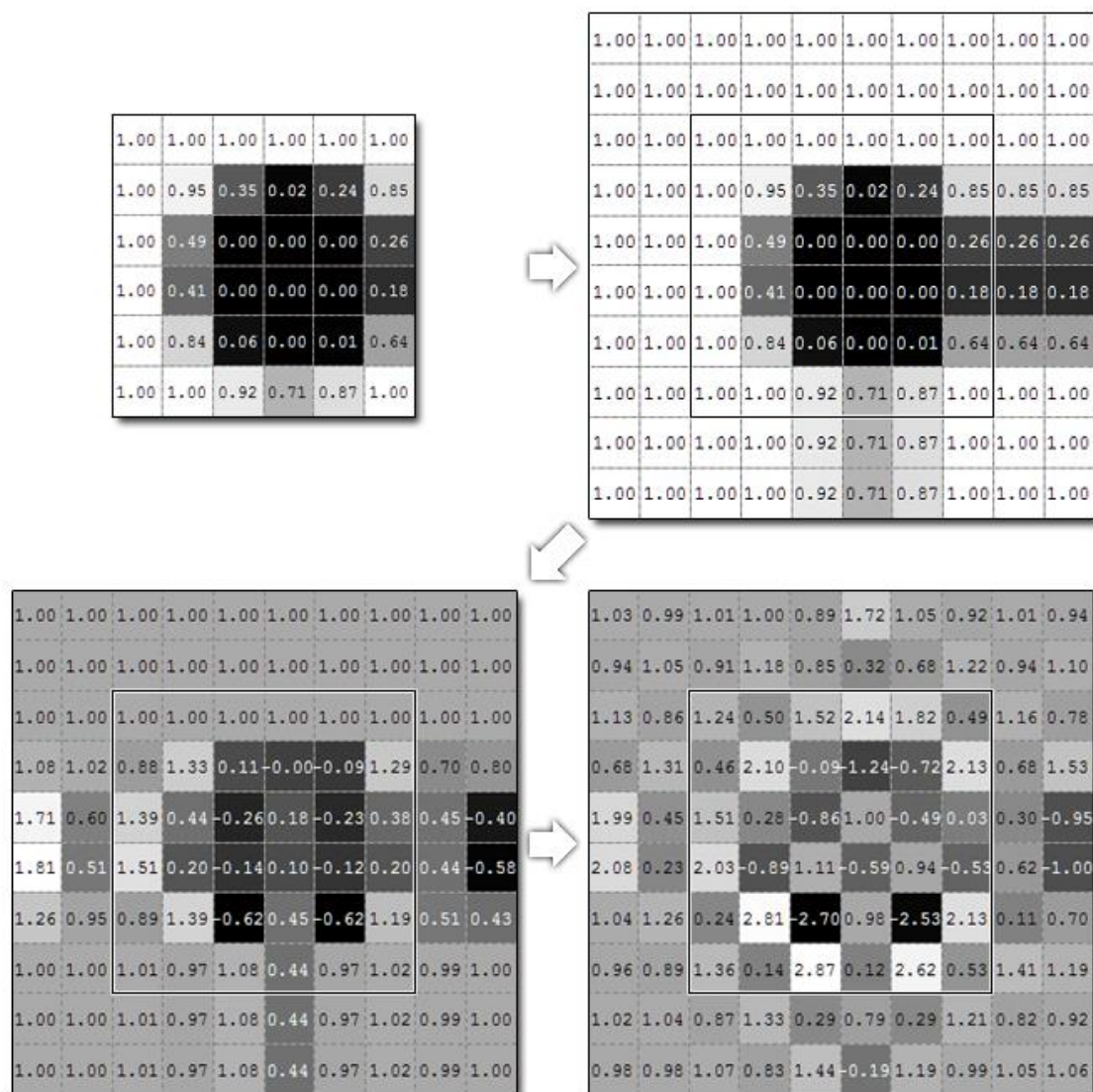
**Figura 19.** Sistema Quintic b-spline. Fuente: Adaptada de (Blaber et al., 2015)

En la imagen anterior cada cuadrado rojo es el valor del pixel, y la curva es esa bspline. Primero se utiliza una interpolación para posteriormente optimizar dicha curva, obteniéndose una posición intermedia a los píxeles mucho más precisa. Se forma el vector  $b_0$ :

$$b_0 = \{1/120 \quad 13/60 \quad 11/20 \quad 13/60 \quad 1/120 \quad 0\}^T \quad (12)$$

2. Centrado el núcleo, se rellena con ceros el mismo tamaño que el número de columnas, es decir, el ancho, de la matriz de escala de grises de la imagen.
3. Se toma el valor de una fila de imagen, se dividen los coeficientes de Fourier de la fila de imagen en forma de elemento con los coeficientes de Fourier de la *padded* b-spline. Tras esto, se toma el valor inverso de los resultados y se guarda en la matriz de escala de grises.
4. Se repiten los pasos 2 y 3, el resultado serán los coeficientes b-splines para el núcleo de la matriz de imágenes.

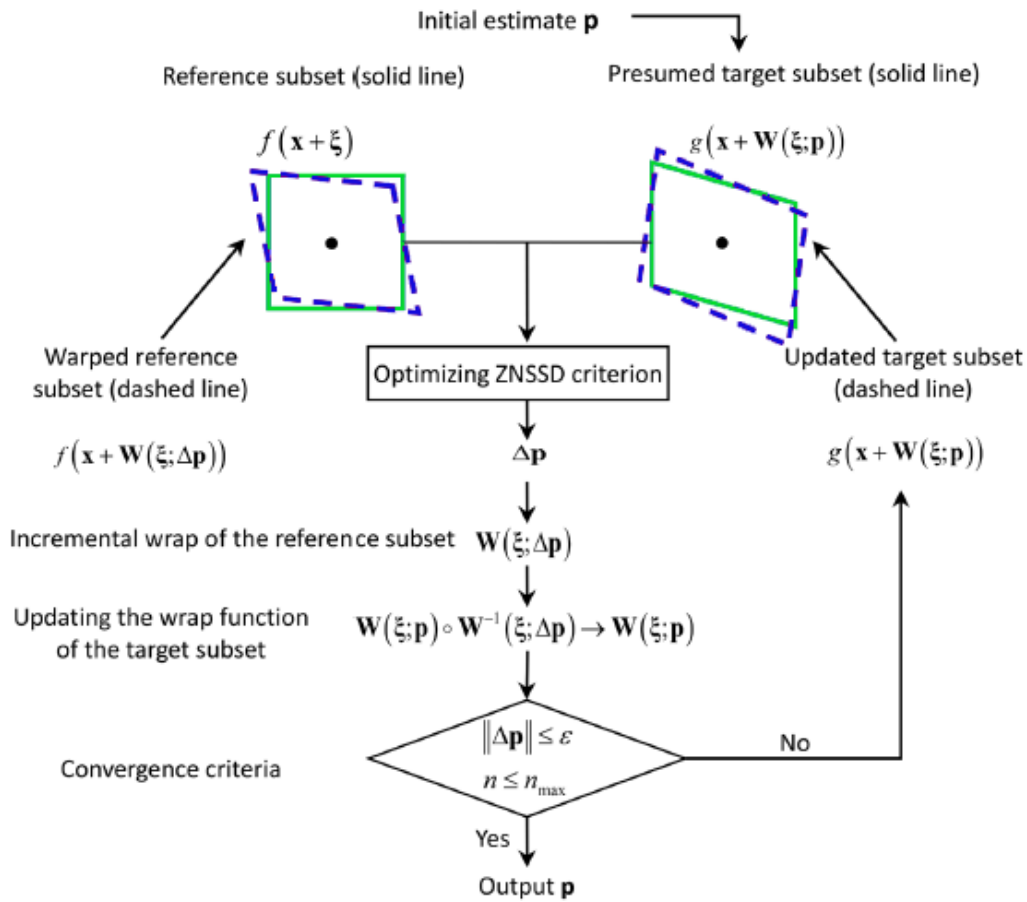
Todo este proceso se muestra en la **Figura 20**.



**Figura 20.** Representación del proceso Quintic b-spline. Fuente: adaptada de (Blaber et al., 2015)

Una vez obtenidos los niveles de gris a tamaño sub-píxel, se procede a obtener la posición espacial para la cual el coeficiente de correlación da un valor “extremum” para ello simplemente basta con aplicar un procedimiento de optimización que trate de buscar las coordenadas imagen x e y para las cuales la correlación sea mínima. Dentro de los posibles enfoques de optimización existentes, el método de Newton-Raphson (NR) es el enfoque más extendido. Sin embargo, este algoritmo presenta el principal inconveniente de su alto costo computacional. Considerando este inconveniente, se ha desarrollado el algoritmo IC-GN (*Inverse-Compositional Gauss-Newton*) con el fin de simplificar el costo computacional sin eliminar la precisión de registro subpíxel (Bing, Hui-Min, Bo-Qin, & Fu-Long, 2006). Este algoritmo además de ser más eficiente que el

algoritmo NR, es más rápido, robusto y preciso en la medición de campo completo de desplazamientos (Figura 21).

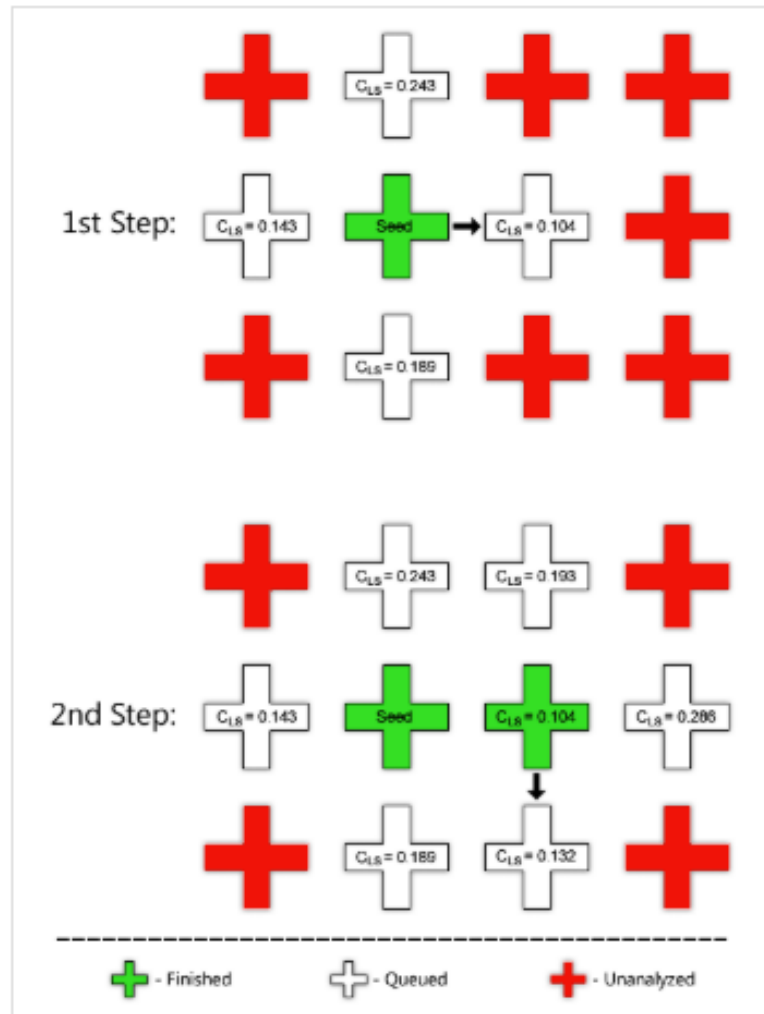


**Figura 21.** Ilustración esquemática del principio del algoritmo IC-GN. Fuente: Adaptada de (Blaber et al., 2015)

Dicho proceso de estimación del vector de desplazamiento del centroide de cada subset es aplicado para toda la región de interés. Ha de tenerse en cuenta que dichos subset dispondrán de una superposición entre sí de aproximadamente 2/3 a fin de asegurar unos resultados robustos en fases posteriores.

Como puede observarse, el proceso de cálculo del vector de desplazamiento es amplio, debiéndose aplicar secuencialmente a todos los subsets. Dicha aplicación secuencial es determinada a través del algoritmo RG-DIC (*reliability-guided digital image correlation*). Este método parte de la selección de un punto inicial o semilla (localización del centro del primer subconjunto de referencia analizado) y procesa el resto de subconjuntos siguiendo un algoritmo que permite la minimización de los errores. El punto inicial puede ser seleccionado de forma manual o automatizada

(empleando el centroide de la ROI; sin embargo, puede estar mal definido como en casos de agujeros en el centro de las probetas). Para el primer subconjunto se calculan los parámetros de deformación correspondientes y de correlación. A continuación, se forma una cola (*queue*) donde se almacenan los valores  $C_{LS}$ , los parámetros de deformación y la localización del centro del subconjunto de referencia ( $X_{refc}$ ,  $Y_{refc}$ ).



**Figura 22.** Direcciones tomadas por el algoritmo RG-DIC. El algoritmo procesa en la dirección del valor  $C_{LS}$  (least square correlation error) más bajo. Fuente: Adaptada de (Blaber et al., 2015).

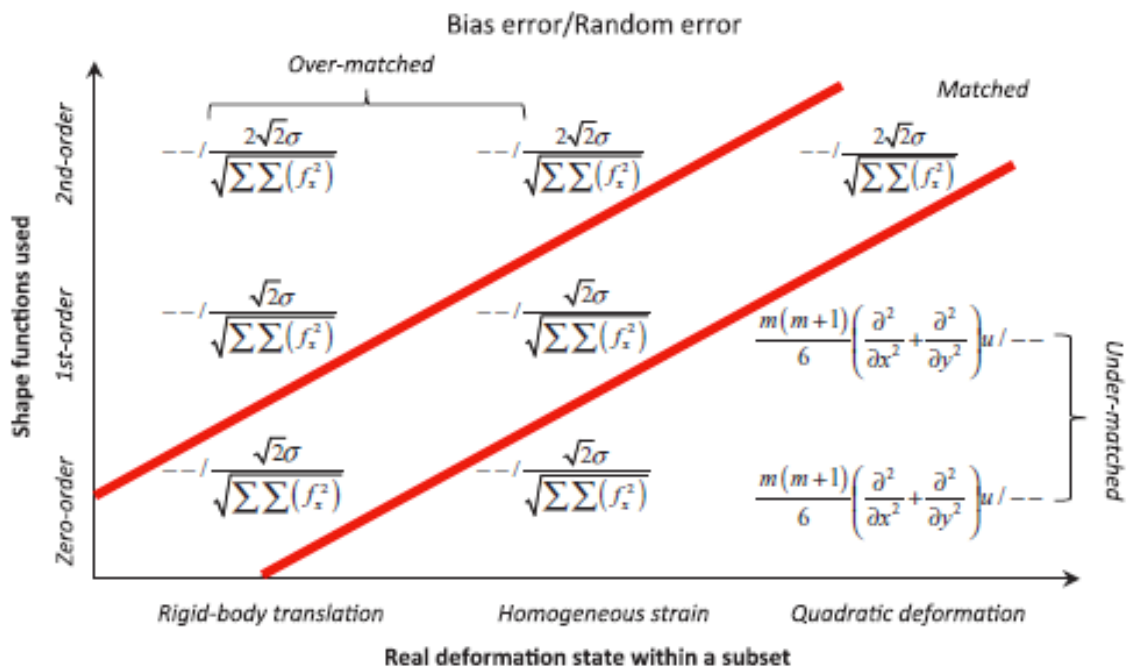
El método RG-DIC presenta dos beneficios principalmente:

- 1) Se trata de un método robusto porque los puntos con datos erróneos (valores de  $C_{LS}$  altos) son procesados en último lugar. De esta forma, se evita que estos datos que presentan errores más elevados se utilicen como estimación inicial para los puntos vecinos.

- 2) El procedimiento es eficiente desde el punto de vista computacional ya que el punto inicial de semilla únicamente requiere emplear NCC o *sift* para determinar una estimación inicial. Además, la estimación inicial para el cálculo proporcionada por el subconjunto adyacente es generalmente buena (siempre que sea relativamente pequeño) debido a que los campos completos de desplazamiento son generalmente uniformes.

### Funciones de forma y campos de desplazamiento completos

El proceso anteriormente detallado permite conocer el desplazamiento del punto central de un subset específico, obteniendo consigo los desplazamientos en puntos concretos. A fin de obtener un campo completo de desplazamientos, la correlación digital de imágenes aplica entre cada subset una función de forma, la cual puede ser de orden cero, primer orden o segundo orden, que permite interpolar los valores de desplazamiento. La deformación real que se produce entre los centroides no puede ser conocida “a priori”, surgiendo posibles problemas de desajuste entre los valores proporcionados por la función de forma y los reales (*under-matched* y *over-matched*) (Figura 23).



**Figura 23.** Errores de sesgo dominantes y errores aleatorios para funciones de forma coincidente y no coincidente. (‘- ‘ indica que el error de sesgo o error aleatorio puede ser descartado). Para funciones de forma coincidentes (*matched*) y superpuestas (*over-matched*), se asume que el error de sesgo puede ser suprimido mediante el uso de

*métodos de interpolación de intensidad de alto orden o prefiltro Gaussiano de paso bajo. Fuente: adaptada de (Blaber et al., 2015)*

### **Campos de deformación**

La obtención de las deformaciones mediante la correlación digital de imágenes requiere de mayor complejidad con respecto al cálculo de los desplazamientos. Teóricamente, las deformaciones podrían ser obtenidas calculando la derivada parcial de los correspondientes desplazamientos (tensor de deformaciones de Green-Lagrange) (Figura 18 (b)), la cual puede ser obtenida directamente de los resultados arrojados por el método IC-GN. Sin embargo, esta derivada se ve altamente afectada por un posible ruido. De esta forma, cualquier ruido en el campo completo de desplazamiento incrementará los errores en el campo completo de la deformación. Por lo tanto, es necesario realizar un suavizado del ruido de manera que pueda aumentarse la precisión de los resultados obtenidos a través de filtros de paso bajo. Sin embargo, la solución más común para obtener los gradientes de desplazamiento es calcularlos de los campos de desplazamiento e ignorar los resultados del método IC-GN. Esta solución utiliza un ajuste de mínimos cuadrados en un subconjunto de datos de desplazamiento ( $u$  y  $v$ ) con el fin de encontrar los parámetros del plano óptimo. Con respecto a la elección de este subconjunto hay que tener en cuenta dos consideraciones: por un lado, los subconjuntos pequeños son incapaces de eliminar el ruido; por otro lado, los subconjuntos grandes pueden provocar elevados errores debido a la aproximación de las deformaciones irregulares dentro de los mismos. Una vez obtenidos los parámetros del plano de mínimos cuadrados ajustado, pueden ser aplicados para obtener el gradiente de desplazamiento para cada uno de los puntos de la ROI. De esta forma puede determinarse el campo completo de deformaciones.

### **1) Correlación de imágenes dentro del método DIC3D**

El método de correlación dentro del método 3D se relaciona fuertemente con el método DIC 2D. La principal diferencia aparece a partir de las funciones de forma. Cabe destacar que en esta metodología aparecen dos cámaras y se debe, no solo coordinar un par de cámaras, si no generar coherencia entre las imágenes registradas. Para conseguir esta coherencia se utiliza la correlación de pares estereoscópicos. Un punto de una imagen obtenida por una cámara, debe ser asociado a otro punto de una imagen obtenida en el mismo momento por la otra cámara. Se obtiene por tanto una nube de puntos para la reconstrucción 3D. Utilizando los algoritmos previamente explicados se



puede determinar las deformaciones y desplazamientos experimentados. en este caso es importante hablar de la reconstrucción 3D(Solav, Moerman, Jaeger, Genovese, & Herr, 2018). Esta reconstrucción como ya se ha comentado se realiza a partir de una nube de puntos 3D. Utilizando los parámetros DLT de cada una de las cámaras, las coordenadas de los puntos se obtienen a partir de la siguiente ecuación.

$$P = [A^T A]^{-1} A^T U \quad (13)$$

Donde tanto A es una matriz cuadrada en la que se relacionan los parámetros de la DLT de cada una de las cámaras y los parámetros de la ecuación (11) La matriz P es la matriz de coordenadas de cada punto. Finalmente, la matriz U es la matriz de diferencia de las coordenadas de la DLT con los parámetros de la cámara. Con estas coordenadas la reconstrucción es posible. Una vez definidas las coordenadas de cada punto y habiendo generado el matching, dentro de la región de interés, ROI, y aplicando los algoritmos previamente utilizados, se puede calcular el campo de deformaciones para cada par de imágenes.



## 4. Resultados experimentales

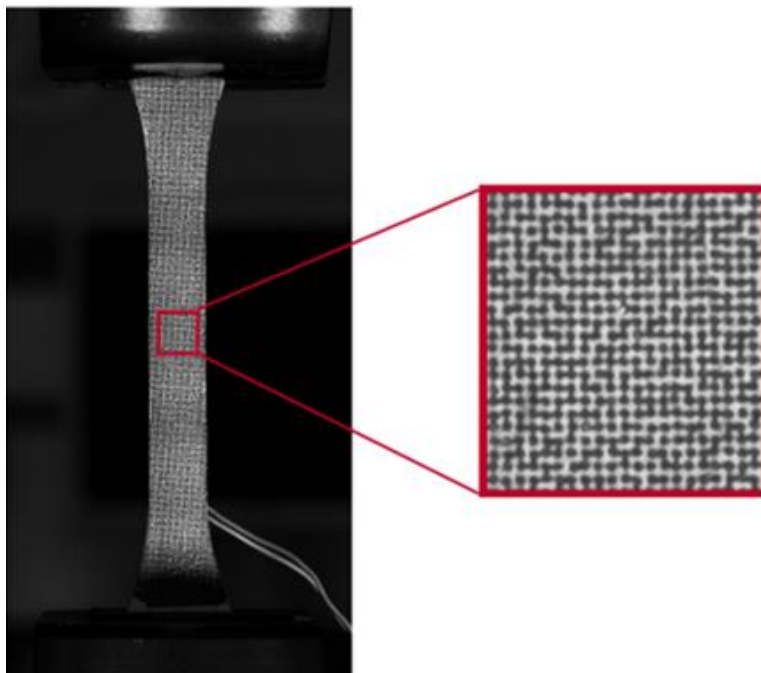
Una vez explicada la teoría de todo el proceso, se procederá a exponer los resultados experimentales derivados de la aplicación del mismo a los composites confeccionados.



**Figura 24.** Diagrama de trabajo. Fuente: Elaboración propia

### a) Fabricación y preparación de probetas

De forma previa a los ensayos se procedió a fabricar un total de 3 probetas de CFRP de acuerdo a los datos expuestos en la anterior sección. Acto seguido se aplicó un patrón Speckle sobre la misma con un diámetro ( $d$ ) de 0,32mm y una distancia entre centros de los círculos ( $step$ ) de 0,58mm. Tras ello, la cuadrícula regular fue perturbada agregando a las coordenadas horizontales y verticales de cada punto un desplazamiento aleatorio de 0,7 veces el GSD.



**Figura 25.** Patrón Speckle creado impregnado en la probeta. Fuente: elaboración propia

Dicho patrón Speckle permitió obtener un coeficiente MIG de 56, siendo estos adecuados y similares a otros estudios experimentales, donde se recomienda una cobertura de entre el 40 y el 70%.

### b) Configuración de los ensayos

Fabricadas las probetas se procedió a realizar los ensayos de tracción de acuerdo a la normativa ISO 527:1997 y a través de la correlación de imágenes tanto en su versión 2D como 3D. Las imágenes requeridas se irán tomando a medida que se el ensayo a través del dispositivo mostrado en la sección anterior (ver Sección XXX). Durante dicho ensayo se usaron un total de 3 cámaras, una perpendicular a la probeta para obtener datos a través de DIC-2D y otras dos oblicuas a la probeta para procesar datos en 3D, formando un ángulo total de  $16^\circ$  con respecto al plano de la probeta, cada cámara tiene una orientación de  $8^\circ$  con respecto al plano de la probeta. Todas las cámaras se configuraron para disparar a 1/100 seg, con una apertura de 7.1 que asegurase un buen campo de profundidad (Figura 21).

Debido a las dimensiones de las probetas, la célula de carga empleada ha sido la de 50kN. La configuración del ensayo, con la toma de datos correspondiente ha sido la siguiente (Tabla 7).

**Tabla 7.** Configuración del ensayo.

Parámetros	Valor
Parámetro de control	Posición
Velocidad (mm/min)	2
Tiempo entre disparos de la cámara (s)	5
Distancia de la cámara (m)	1

a)



b)

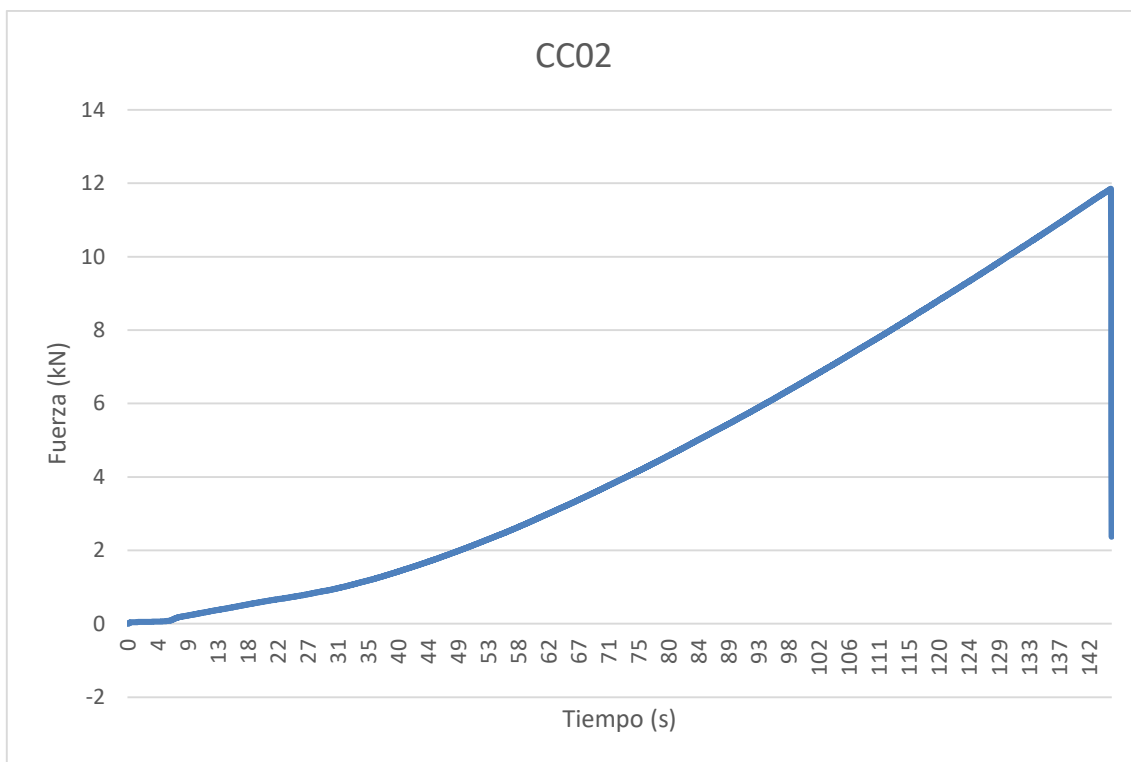


**Figura 26.** (a) Disposición de las cámaras. Las cámaras en los extremos son las del método DIC 3D y la central la del método DIC 2D. (b) Disposición de los focos LED para la iluminación correcta de la probeta. Datos capturados durante el ensayo. Fuente: elaboración propia

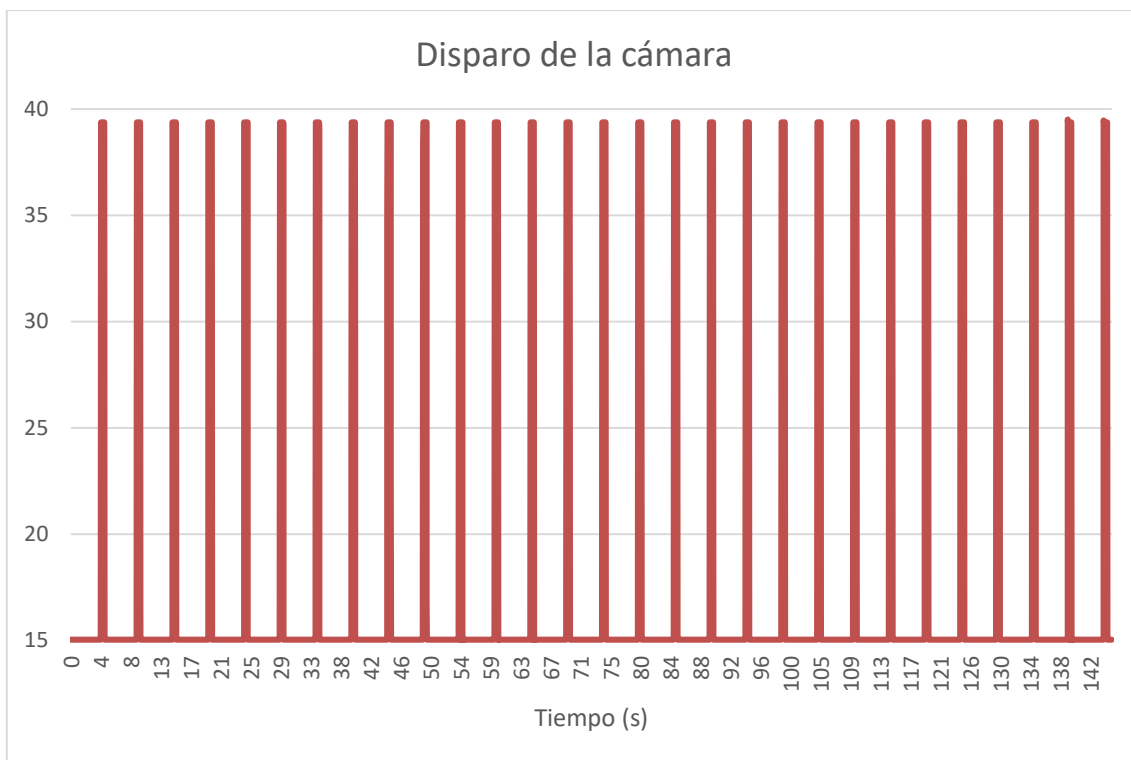
Durante la realización de los ensayos fueron capturadas un total de 61 imágenes por la cámara central (para DIC 2D) y 122 por las cámaras oblicuas además de los datos procedentes de la célula de carga de la máquina para las dos probetas ensayadas (Tabla 8 y Tabla 9) (Figura 27 y **Figura 29**). El GSD medio de las imágenes fue de 0,9 milímetros/pixel.

**Tabla 8. Resultados probeta CC02.**

Carga de rotura (kN)	11,85540881
Carga elástica (kN)	10,70606877
Deformación máxima (mm)	4,080450625
Rigidez (kN/mm)	2,654524661
Energía (J)	21,99846367
Tiempo de rotura (s)	116,47
Tiempo de ensayo (s)	145,28



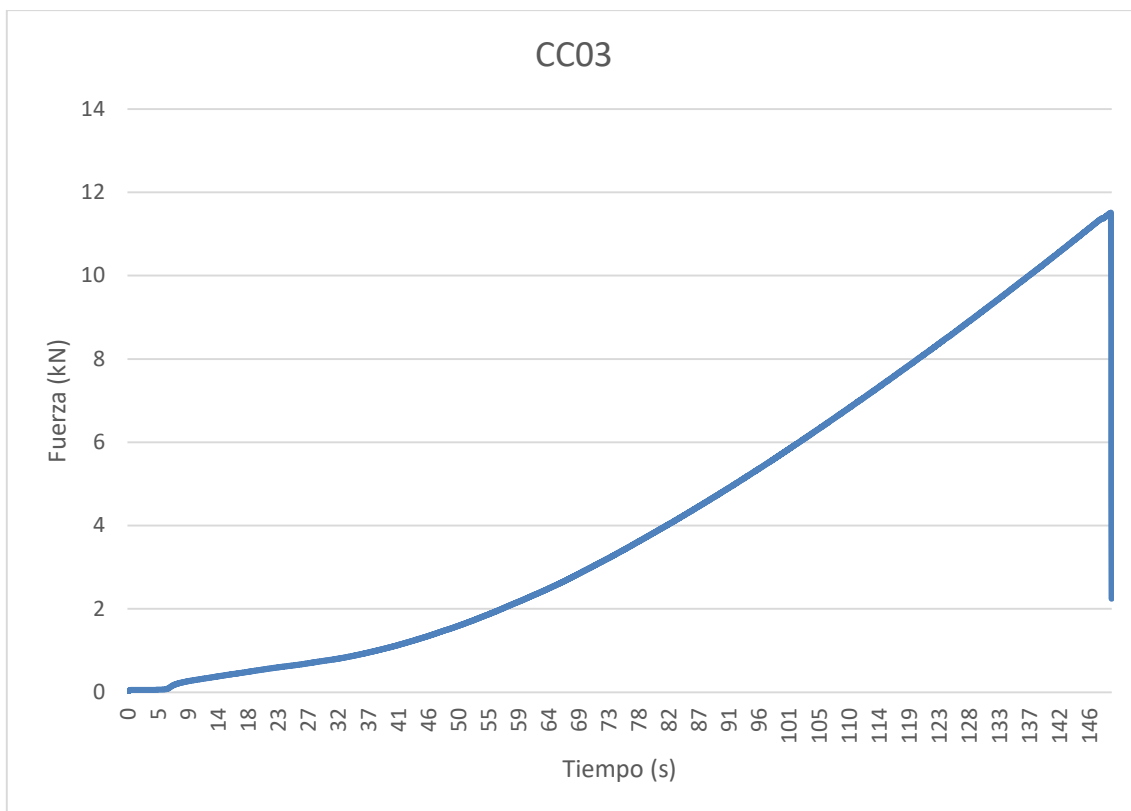
**Figura 27.** Curva probeta CC02 obtenida a través de la célula de carga. Fuente: elaboración propia



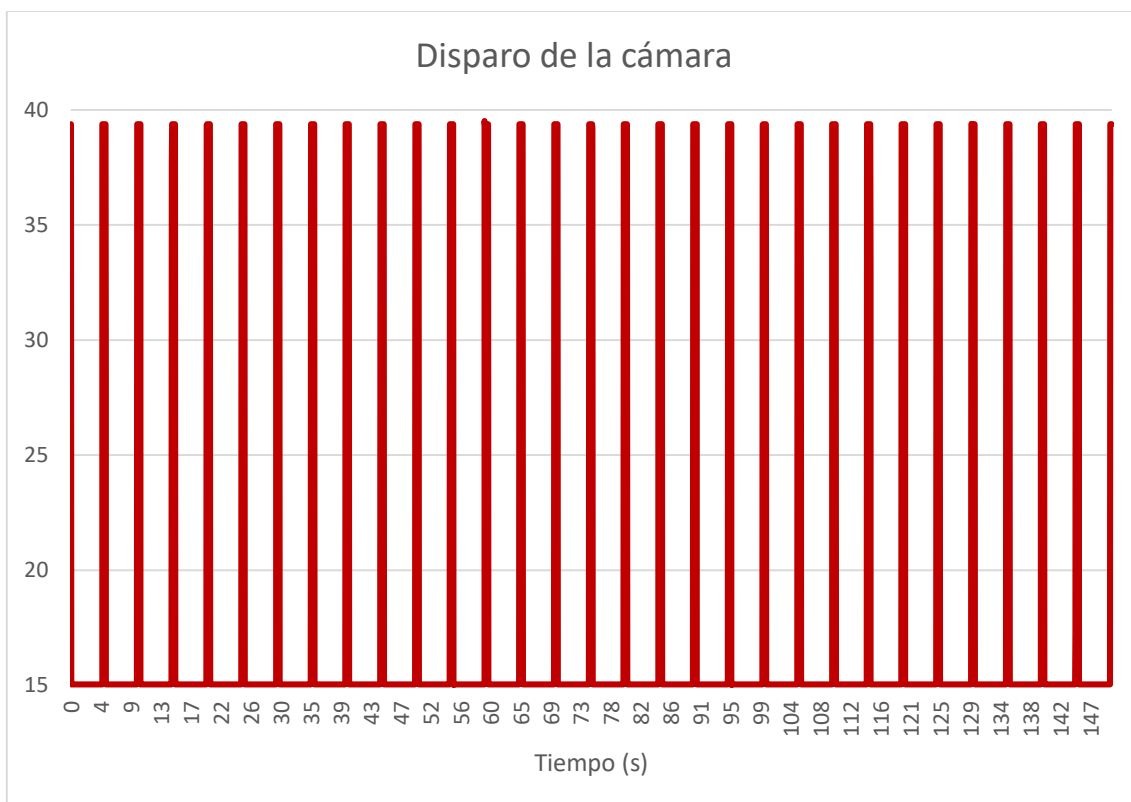
**Figura 28.** Momentos de disparo durante el ensayo sobre la probeta CC02. Fuente: Elaboración propia

**Tabla 9.** Resultados probeta CC03

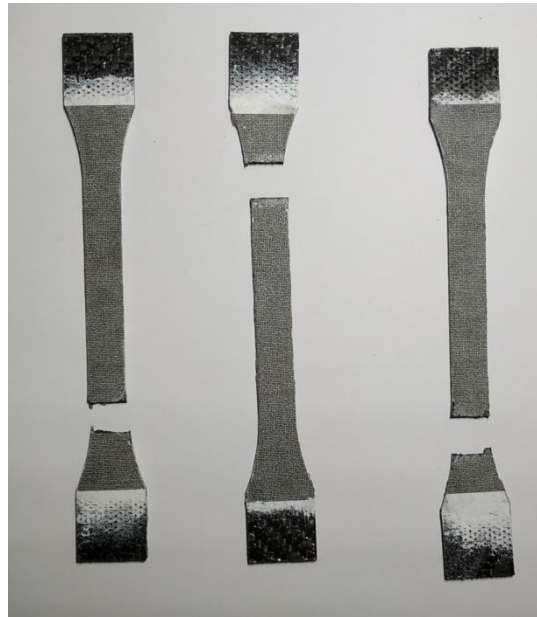
Carga de rotura (kN)	11,51331745
Carga elástica (kN)	10,11497767
Deformación máxima (mm)	4,12352189
Rigidez (kN/mm)	2,482319108
Energía (J)	20,90066423
Tiempo de rotura (s)	118,35
Tiempo de ensayo (s)	149,72



**Figura 29.** Curva probeta CC03 obtenida a través de la célula de carga. Fuente: elaboración propia



**Figura 30.** Momentos de disparo durante el ensayo sobre la probeta CC03. Fuente: Elaboración propia



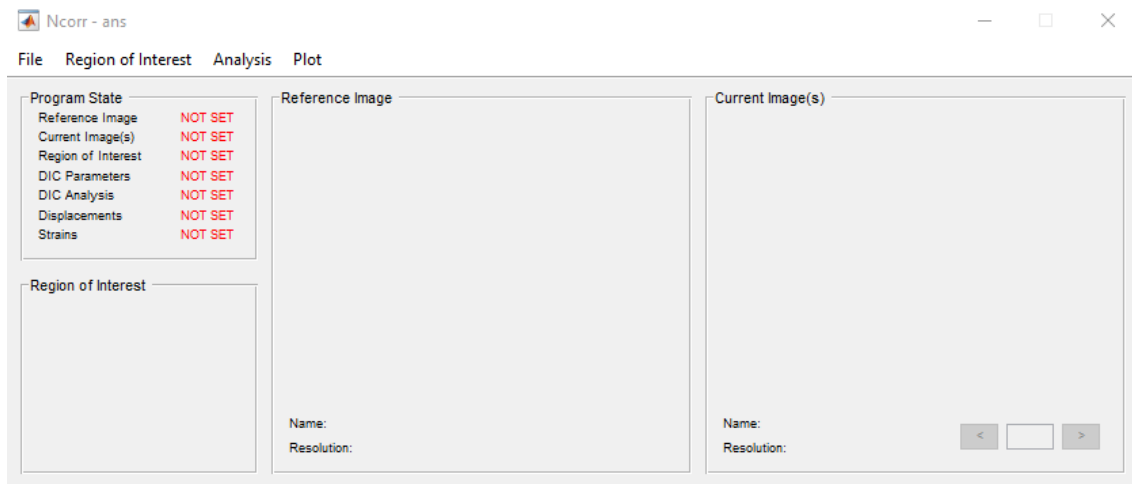
**Figura 31.** Probetas tras la rotura. Fuente: elaboración propia

### c) Post-procesado: aplicación del método de Correlación Digital de Imágenes

Con las imágenes capturadas durante el ensayo se procedió a aplicar el método de correlación de imágenes en 2D para las imágenes capturadas por la cámara central, y el método de correlación en 3D para las imágenes capturadas por las cámaras situadas en diagonal. Ambos métodos siguieron el esquema de trabajo detallado en la sección anterior, utilizándose para ello dos software open-source desarrollados en Matlab®: el software NCoor para el 2D(Blaber et al., 2015) y MultiDIC para el 3D(Solav et al., 2018).

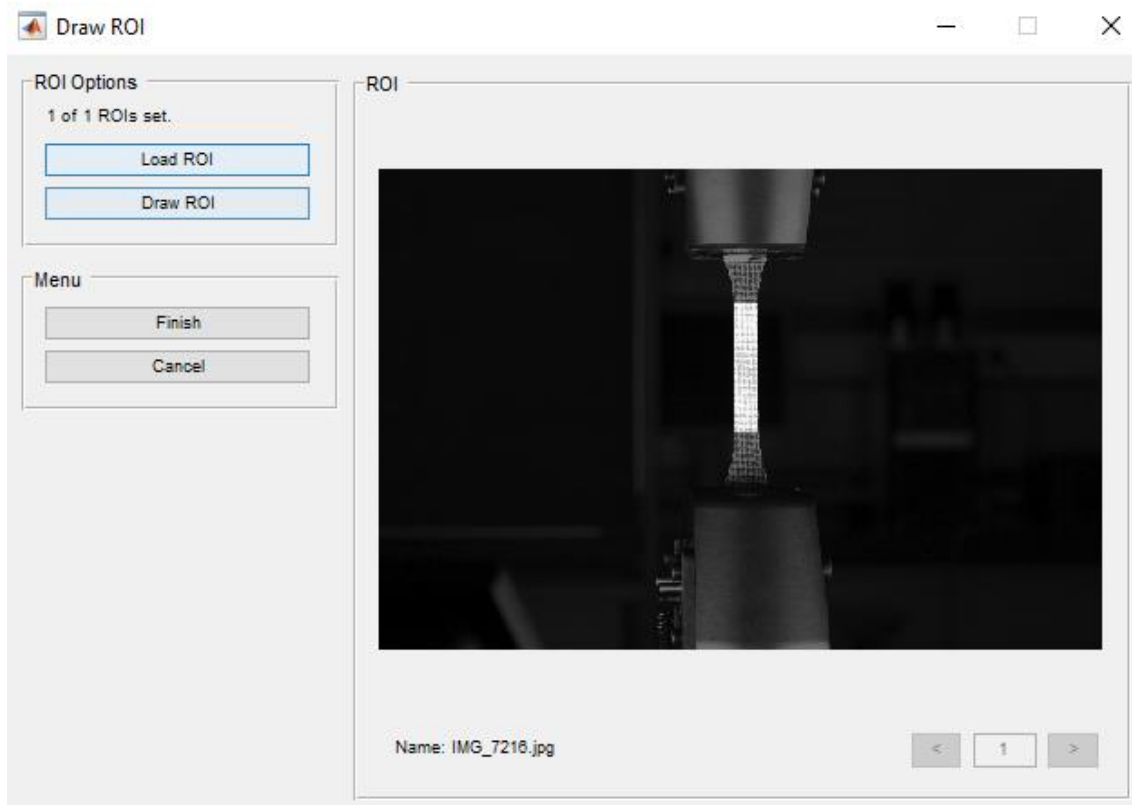
#### DIC 2D

Como ya se ha mencionado anteriormente, para el procesado DIC 2D se ha utilizado el software Ncorr(Blaber et al., 2015) en el que los diferentes algoritmos que utiliza ya se han desarrollado en el apartado Materiales y Métodos. A continuación, se va a describir el proceso para poder realizar un análisis del material a través del método DIC 2D. Para proceder con el procesado es necesario que durante el ensayo se haya realizado una foto previa donde aún no se ha aplicado carga alguna. Esa imagen será la imagen de referencia. Como se puede ver en la a la izquierda aparece una región denominada “Program State” que es una pequeña guía de cómo utilizar dicho programa ya que hasta que no esté todo en “SET” y en color verde no se podrá seguir con el análisis.



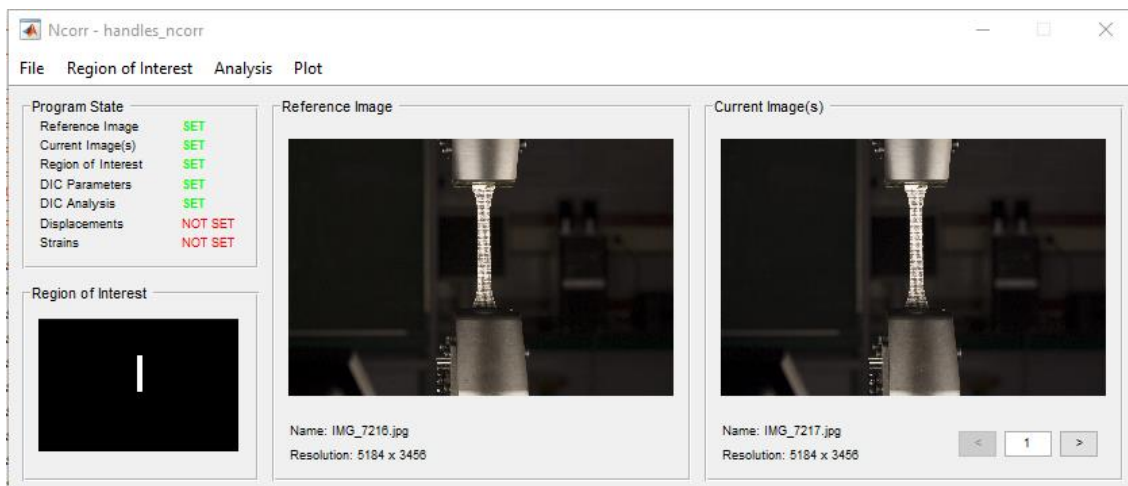
**Figura 32.** Interfaz Ncorr. Fuente: Elaboración propia

Una vez cargadas las imágenes hay que definir una región de interés, así como los parámetros necesarios para poder realizar el análisis. Es importante que en la región de interés este en el área de sección constante, ya que según la hipótesis de Bernuilli las tensiones en dicha área serán homogéneas. Ha de hacerse notar que dicho software no usa un subset cuadrado sino circular pero que sigue el mismo proceso que uno cuadrado. Debido a la configuración de la imagen, el radio es de 10 píxeles y el espaciado es de 7 (2/3 de solape).



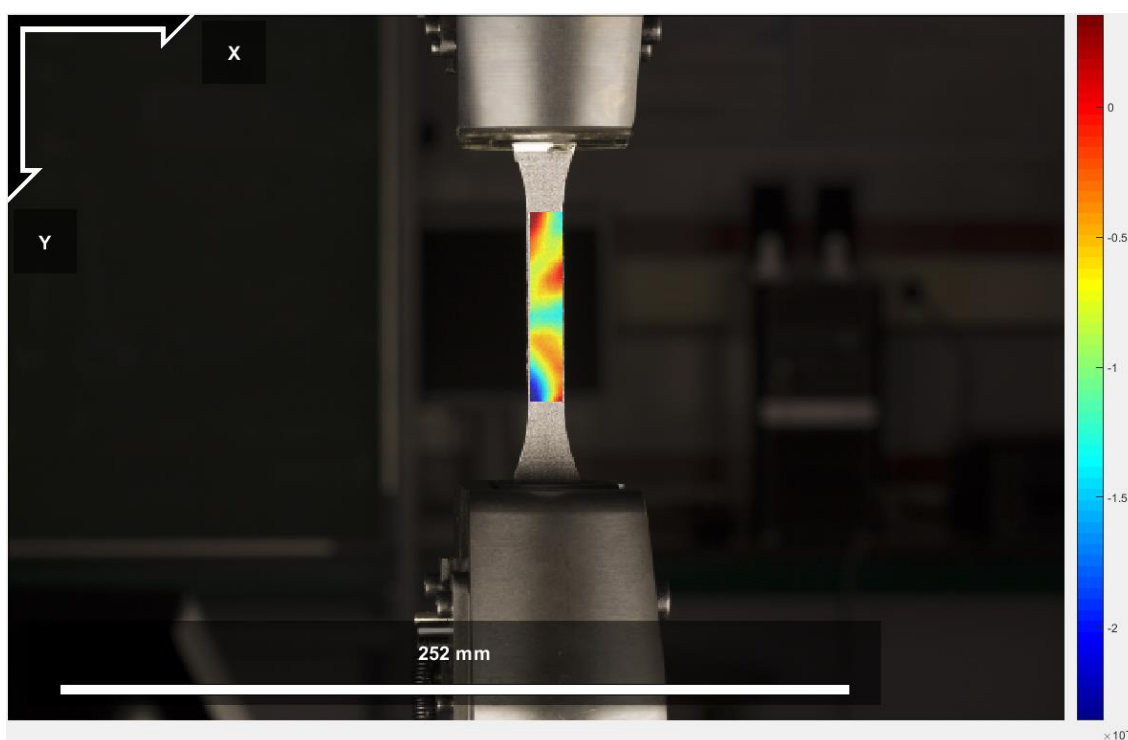


**Figura 33.** Región de interés seleccionada. Fuente: elaboración propia



**Figura 34.** Interfaz Ncorr tras el análisis DIC. Fuente: Elaboración propia

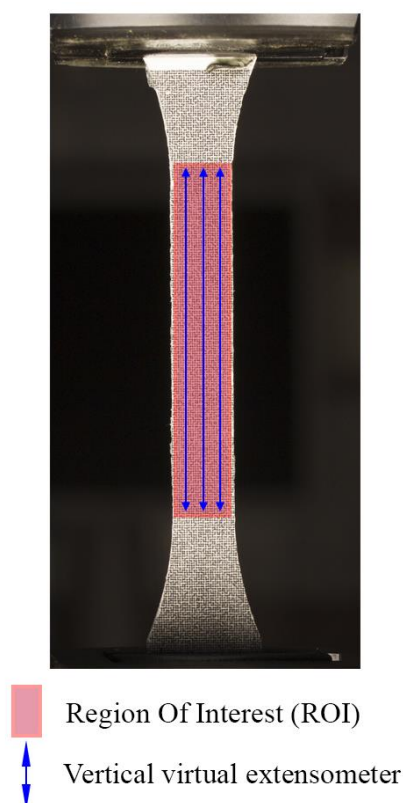
Para poder definir los desplazamientos y las deformaciones, es necesario definir la relación longitud/píxel. Se puede introducir un valor previamente calculado, o se puede utilizar la imagen de referencia, eligiendo una longitud conocida. En este caso, por ejemplo, se ha utilizado la imagen de referencia previa a comenzar el ensayo, y el ancho de la probeta, que se conoce que es de 11.1mm de ancho, medido con un calibre. Tras definir esta relación se pueden calcular desplazamientos y deformaciones.



**Figura 35.** Campo de deformaciones sobre la región de interés. Fuente: Elaboración propia

No obstante, para poder llevar a cabo un análisis aún más exhaustivo, y permitir obtener parámetros mecánicos del composite, se va a aplicar el concepto de extensómetro virtual. El extensómetro virtual es un artificio del software que permite evaluar la distancia entre dos puntos a lo largo del ensayo.

En primera instancia el software pide que se escalen las distancias. Una vez escaladas se pueden añadir extensómetros virtuales. Se colocará uno lo más centrado posible y otros dos extensómetros virtuales separados 3mm a la izquierda y derecha del central respectivamente. Todo este proceso se realiza de la misma manera en las diferentes probetas registradas.



**Figura 36.** Colocación de extensómetros virtuales. Fuente: elaboración propia

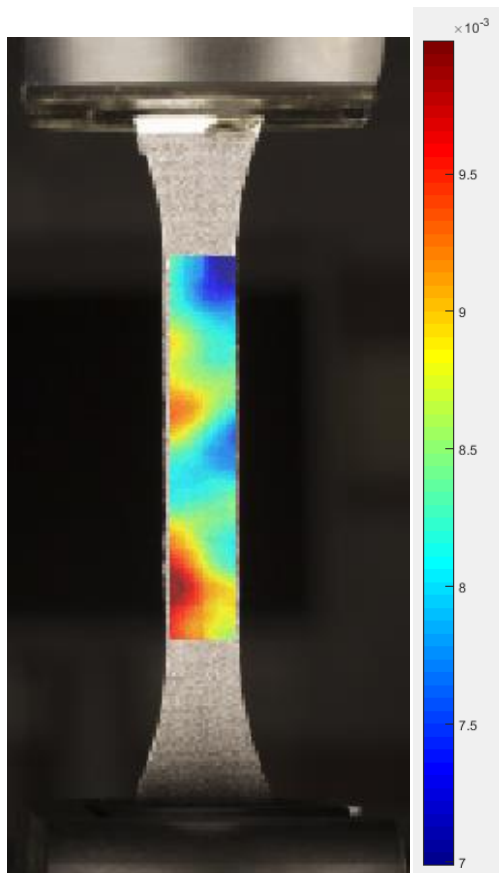
Tras este procesado los resultados obtenidos son los siguientes (Tabla 10 y Tabla 11) (Figura 37 y Figura 38).

**Tabla 10.** Resultado probeta CC02

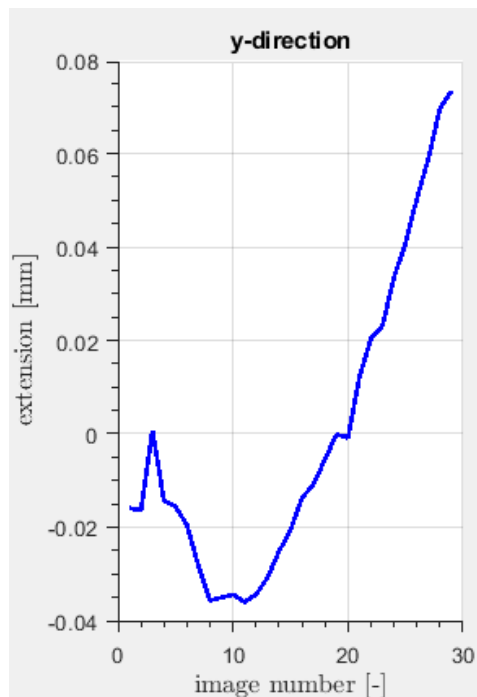
Desplazamiento máximo en y (mm)	2,1571
---------------------------------	--------

Deformación máxima en y	0.0102
Desplazamiento máximo en x (mm)	0.2119
Deformación máxima en x	0.0030
Poisson medio	0.17

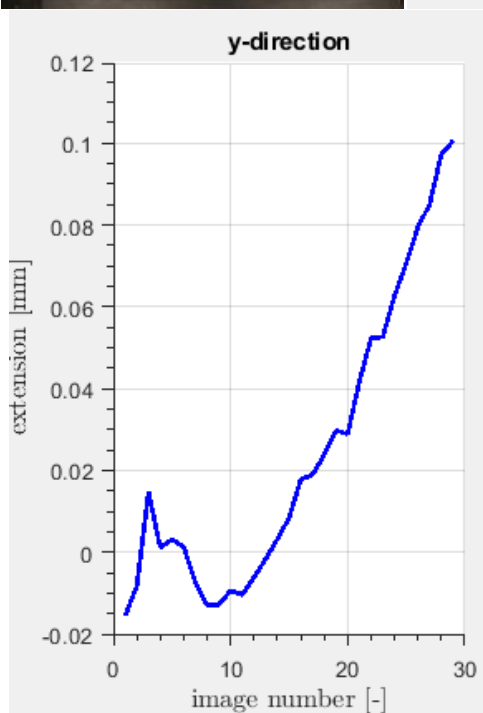
a)



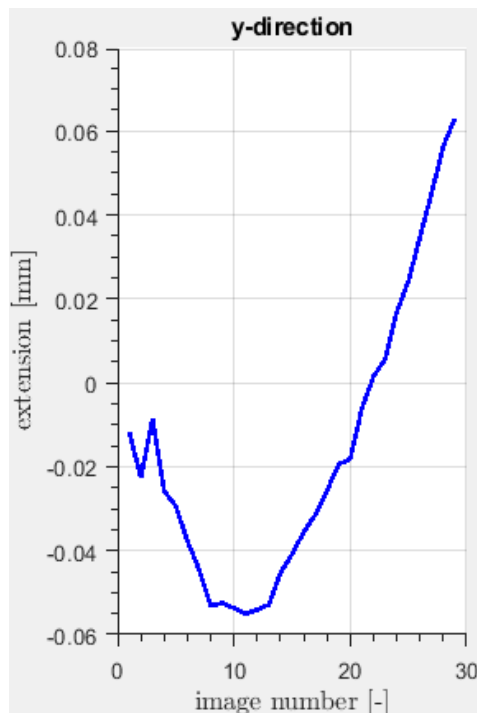
b)



c)



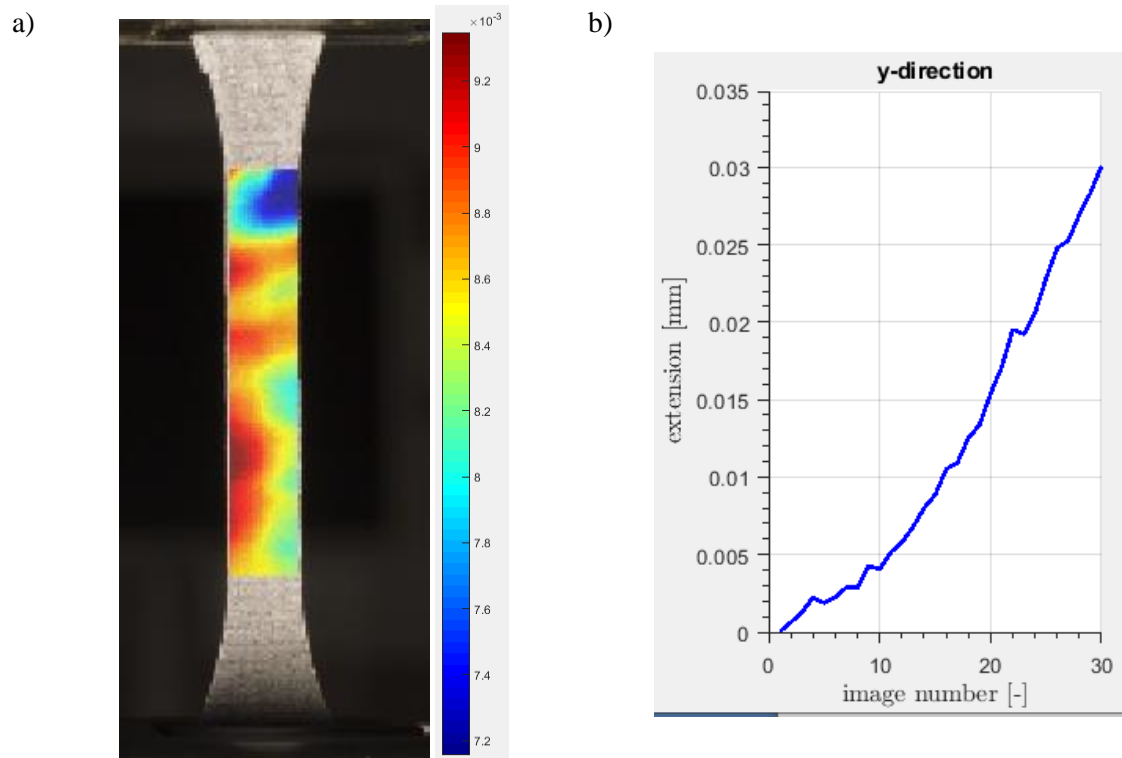
d)

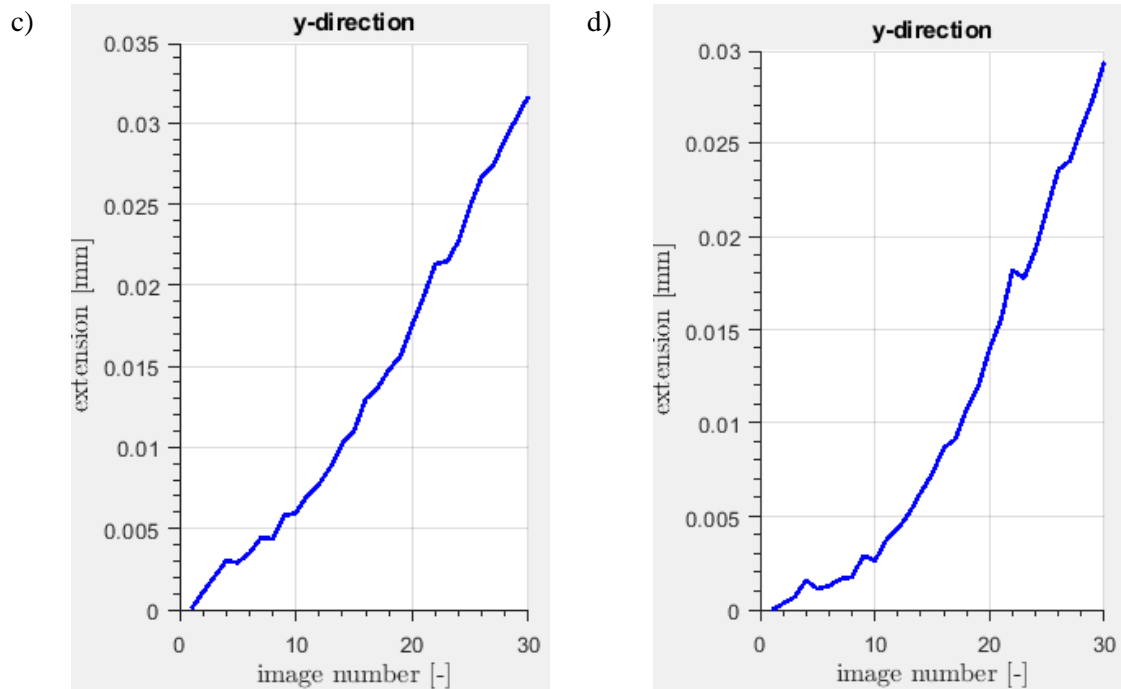


**Figura 37.** (a) Campo de deformaciones sobre la probeta. (b), (c) y (d) Resultados de extensómetro 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 11.** Resultados probeta CC03

Desplazamiento máximo en y (mm)	2,1656
Deformación máxima en y	0.0095
Desplazamiento máximo en x (mm)	0.2278
Deformación máxima en x	0.0015
Poisson medio	0.17

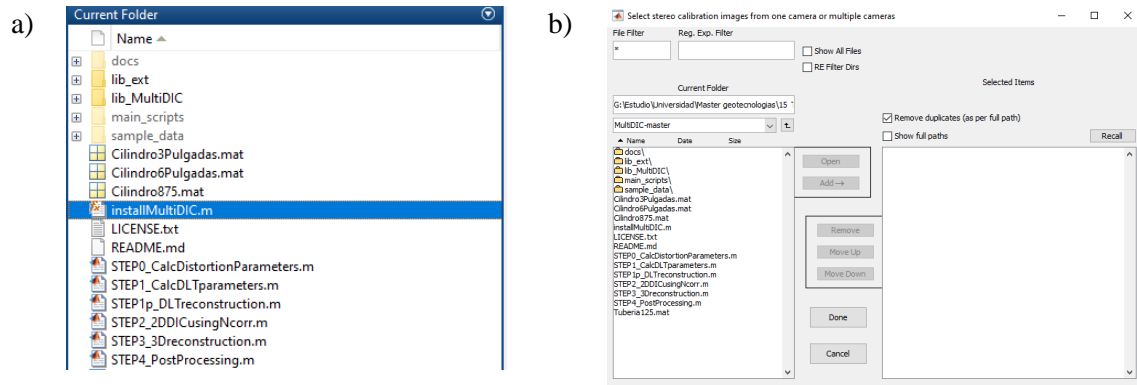




**Figura 38.** a) Campo de deformaciones sobre la probeta. b), c) y d) Resultados de extensómetro 1, 2 y 3 respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

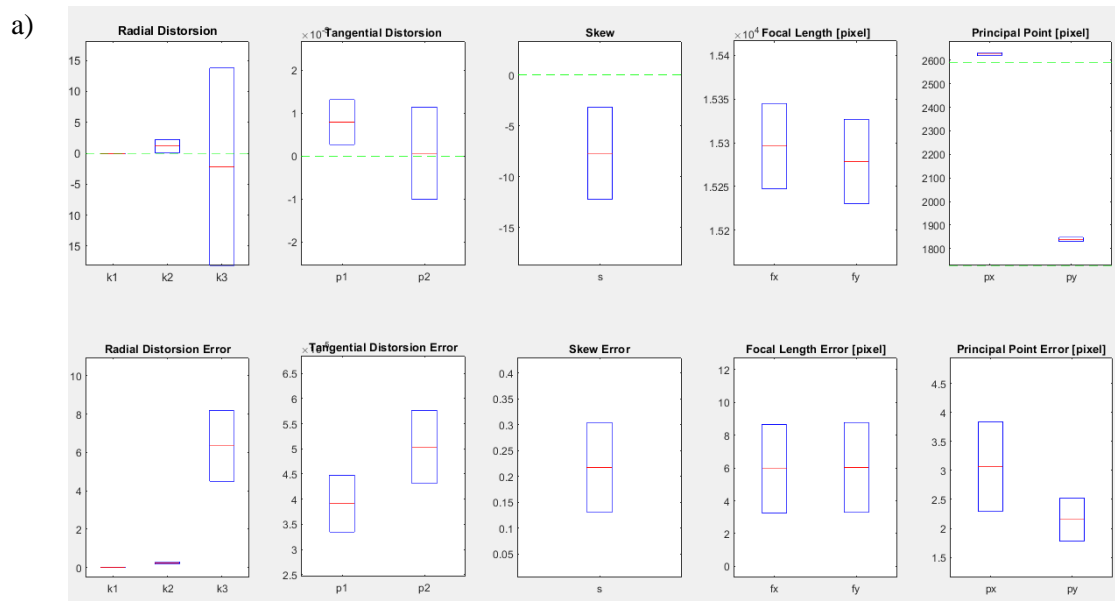
### DIC 3D

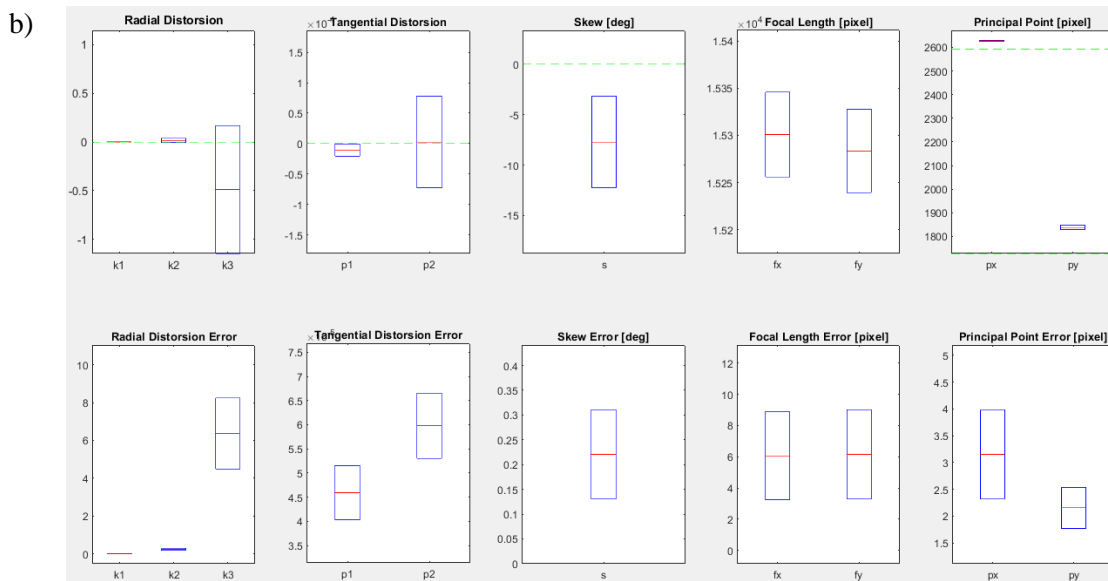
Como se ha mencionado anteriormente, se ha utilizado el software de acceso libre MultiDIC (Solav et al., 2018). Con este software se podrán calcular los desplazamientos, así como la reconstrucción de la propia probeta en 3D. Es importante conocer la orientación de las cámaras, que ya se ha comentado en apartados anteriores. Una vez obtenidas todas las imágenes durante el ensayo se comenzará con el procesado. En primer lugar, el propio software pedirá las imágenes del patrón de calibración tanto plano como cilíndrico. Una vez está esto completado, el propio software empieza a pedir pares de imágenes de la probeta con el Speckle adherido. Aquí comienza la reconstrucción. El software es muy intuitivo en este sentido ya que indica el orden de los pasos a seguir y pide claramente que documentos necesita en cada caso con una ventana de selector de archivos.



**Figura 39.** (a) Orden de ejecuciones para poder realizar el procesado DIC 3D; (b) Ventana de selección de archivo. Fuente: elaboración propia

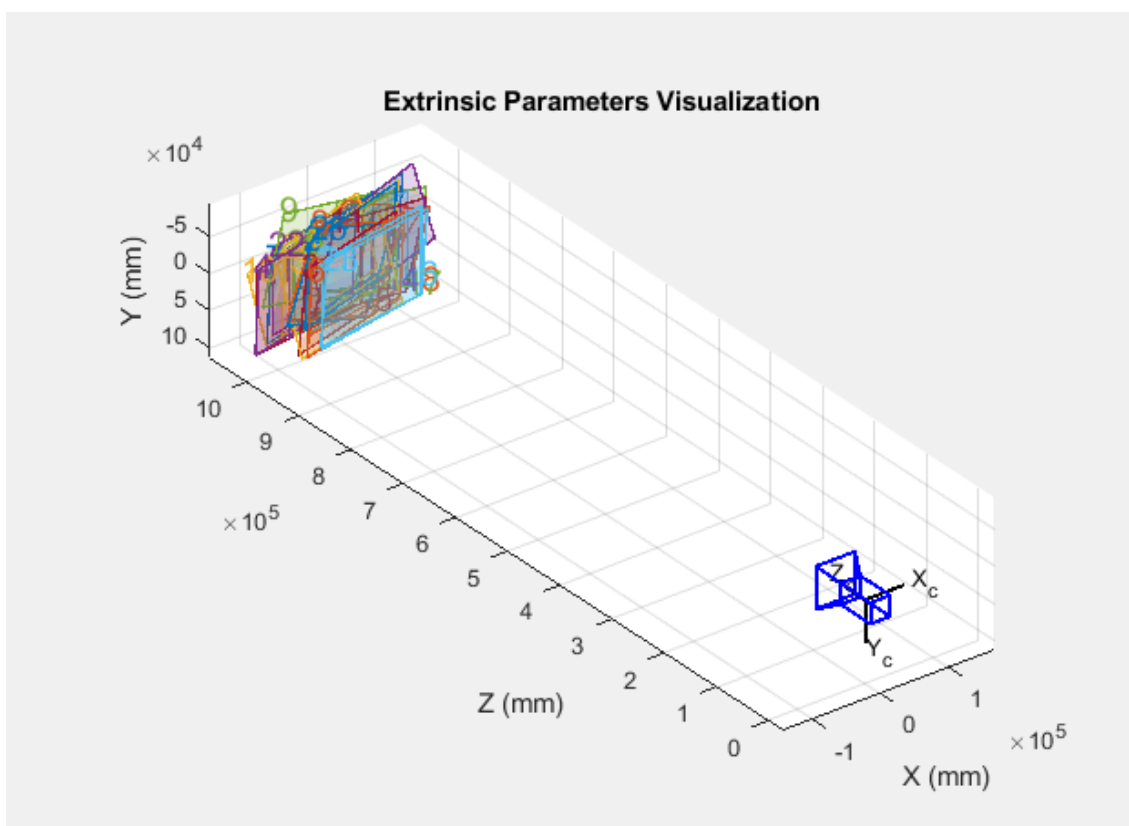
Previo al procesado como tal, el propio software permite visualizar en forma de imágenes los parámetros intrínsecos previa corrección y tras haber aplicado dicha corrección como puede observarse en la Figura 40.





**Figura 40.** Parámetros intrínsecos. (a) Antes de la corrección de la distorsión radial; (b) después de la corrección de la distorsión radial. Fuente: elaboración propia.

Además, también indica los parámetros de la cámara, así como una reconstrucción de la escena de calibración en la que se representan las diferentes posiciones que ha tenido la tabla de calibración dando los parámetros extrínsecos de la propia calibración.



**Figura 41.** Representación de los parámetros extrínsecos de la calibración. Fuente: elaboración propia.

Los parámetros de las diferentes cámaras son los siguientes:

**Tabla 12.** *Parámetros intrínsecos de la cámara.*

		Cámara 1		Cámara 2	
		Sin corregir	Con corrección	Sin corregir	Con corrección
Distancia focal	$f_x$	15247	15256	15345	15346
	$f_y$	15230	15239	15327	15328
Punto principal	x	2619.6	2626.4	2632.9	2629.4
	y	1830.9	1829.9	1847.3	1847.3
Distorsión radial	$k_1$	-0.09833	-0.0001861	-0.08283	7.944e-05
	$k_2$	2.212	0.03591	0.114	-0.003763
	$k_3$	-18.13	-1.143	13.78	0.1687
Distorsión tangencial	$p_1$	0.0002691	-2.078e-05	0.001317	-5.237e-07
	$p_2$	0.001138	7.772e-05	-0.001005	-7.245e-05
Sesgo	s	-12.22	-12.23	-3.186	-3.172

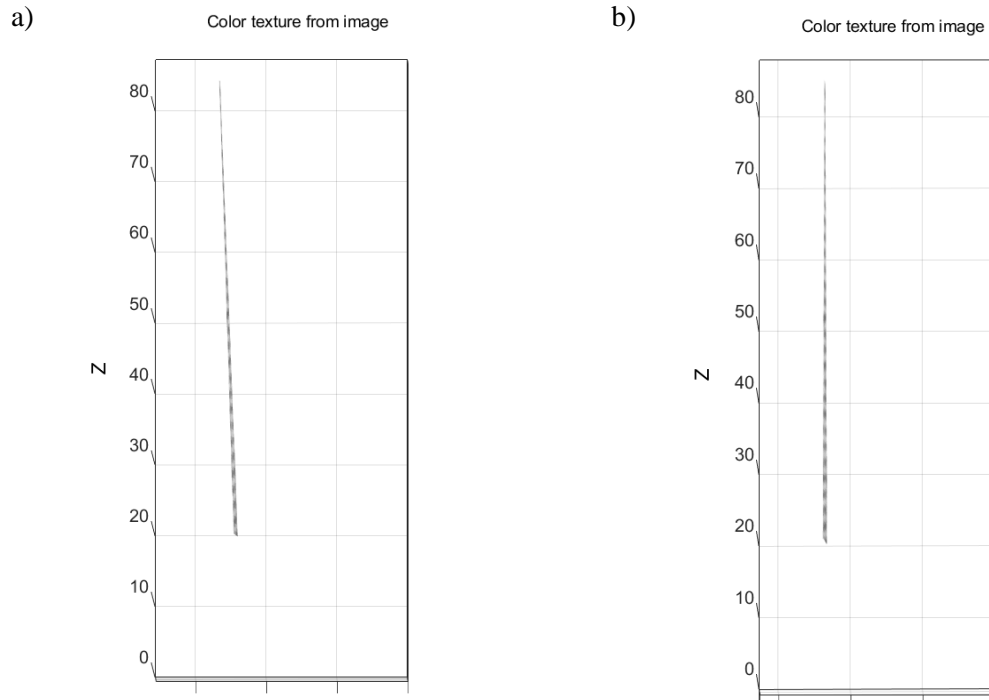
### Corrección sobre el eje z

Al reconstruir en 3D la probeta se puede comprobar que el eje z, el longitudinal (eje y en el caso del DIC 2D) no está perfectamente alineado. Cualquier otro eje no conllevaría un problema asociado, pero este eje coincide con la dirección del ensayo, por lo que los desplazamientos y deformaciones no quedarían perfectamente definidos tras el procesado. Por esta razón es muy importante poder corregir dicho eje. Para ello, se ha calculado el giro con respecto al eje y se ha llegado a la conclusión de que el giro es de 2°. La corrección por tanto se ha realizado a través de una matriz de rotación:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (14)$$

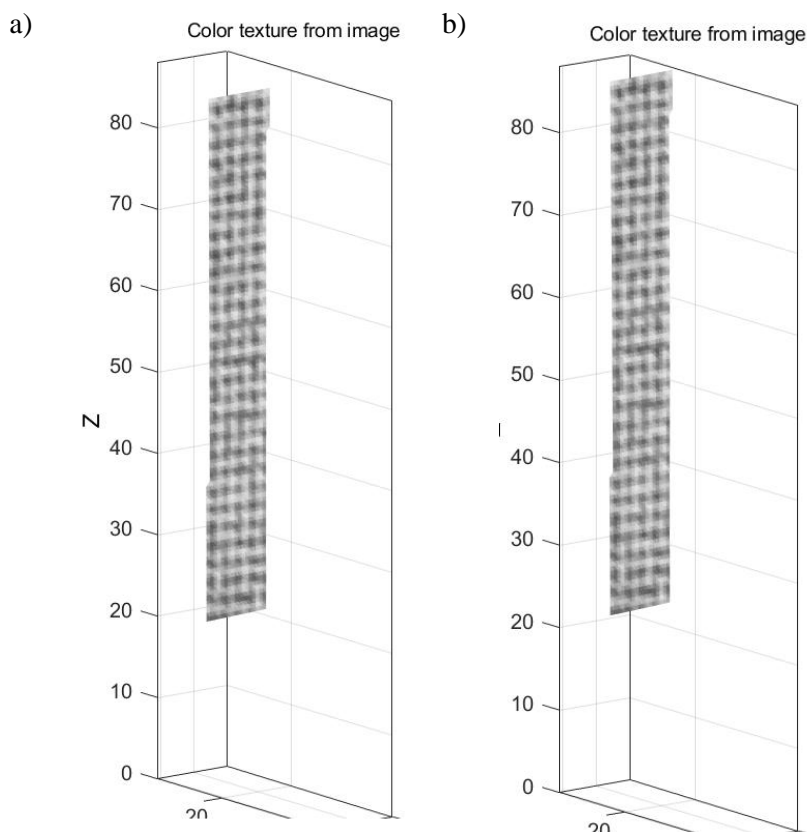
Siendo  $\alpha$  el giro con respecto al eje z. Tras cambiar las coordenadas de los puntos en la reconstrucción 3D, el resultado de la rotación queda representado en la Figura 42.





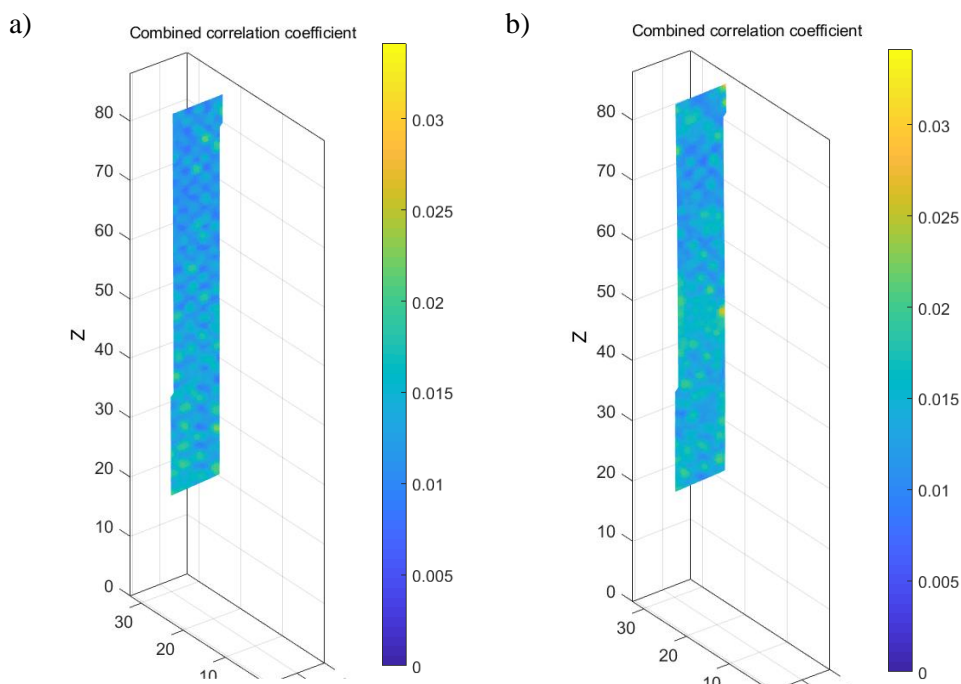
**Figura 42.** a) Reconstrucción previa a la rotación; b) reconstrucción tras la rotación.  
Fuente: elaboración propia

Una vez corregido el giro del eje  $z$ , se comienza con el procesado 3D. En primer lugar, como se comentó en el apartado de calibración, se calculan los diferentes parámetros de distorsión para minimizar las distorsiones propias de la cámara. Tras esto se reconstruye en 3D las probetas.



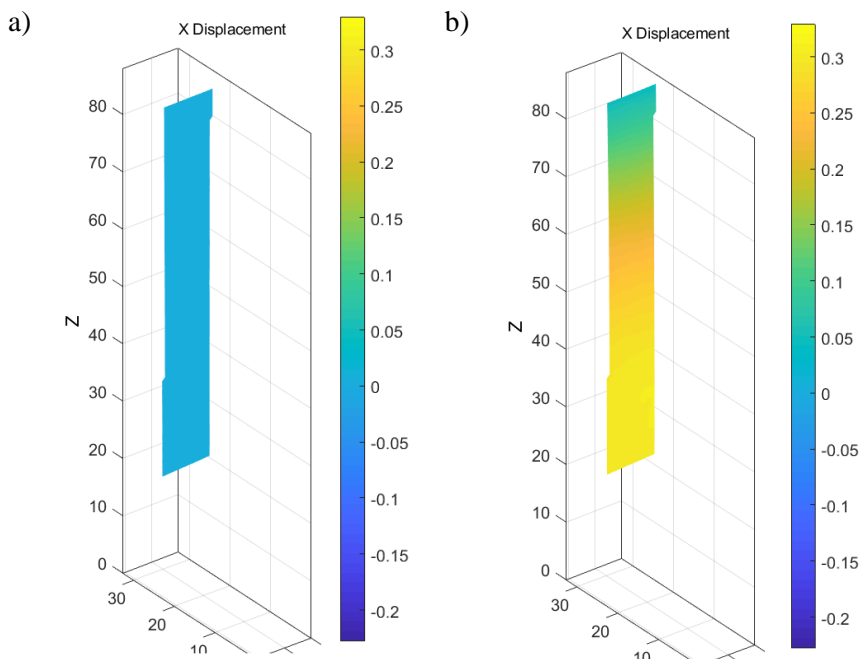
**Figura 43.** Reconstrucción 3D de las probetas. a) Reconstrucción de la imagen de referencia; b) reconstrucción de la última imagen. Fuente: Elaboración propia.

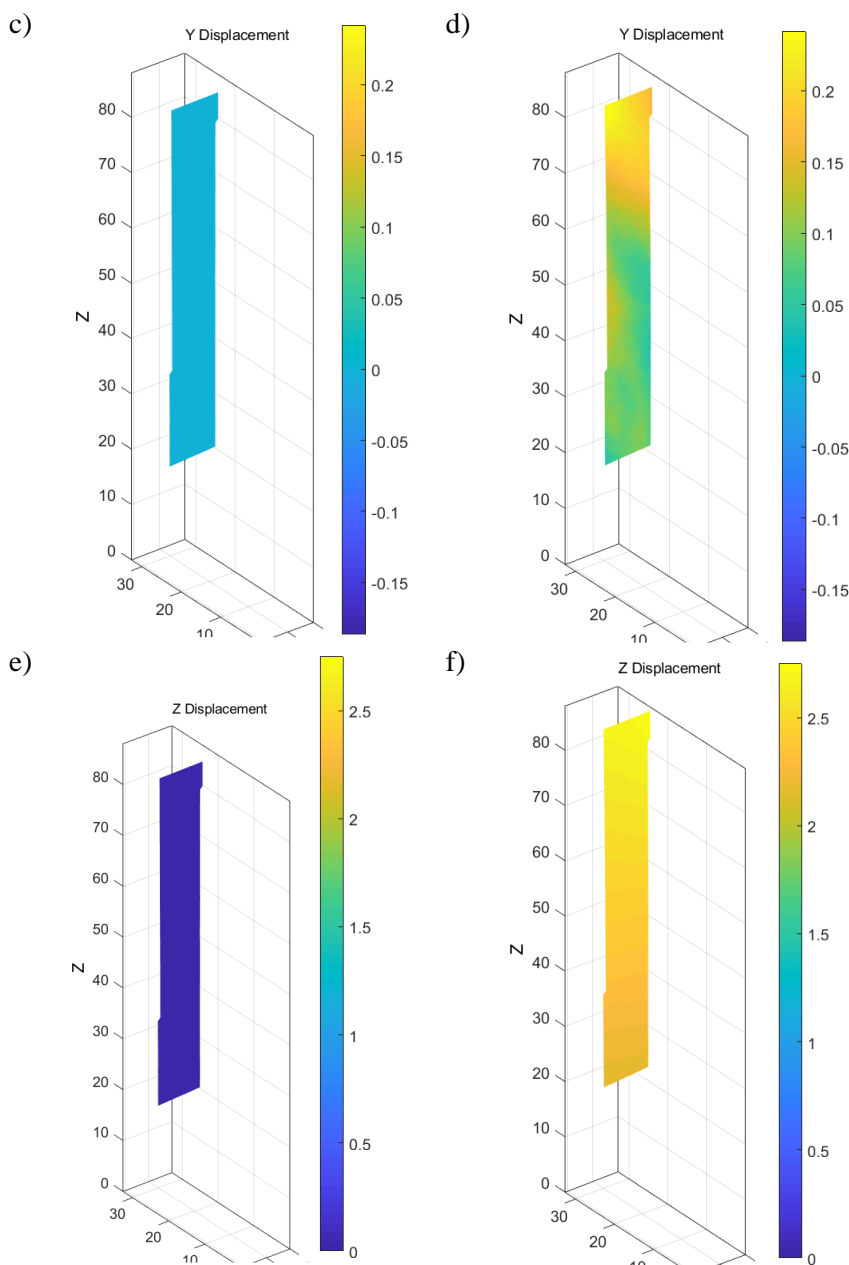
Una vez reconstruido, se puede realizar el cálculo de desplazamientos y deformaciones. Gracias a que cada punto tiene unas coordenadas asignadas, es posible calcular los desplazamientos. No obstante, primero es importante destacar el índice de correlación. MultiDIC crea un campo de índices de correlación como puede apreciarse en la Figura 44.



**Figura 44.** Campo de índices de correlación. a) Imagen de referencia b) última imagen del ensayo. Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse en la Figura 44, el peor índice de correlación no llega a 0,04 siendo aceptable todo aquel inferior a 0,1, por lo que los resultados son realmente satisfactorios. Gracias a estos resultados se puede proceder por tanto a comprobar los campos de desplazamiento de las probetas en todos los ejes.





**Figura 45.** Campos de desplazamientos en la probeta con MultiDIC. a) Imagen de referencia para desplazamientos en x; b) Campo de desplazamientos en eje x; c) Imagen de referencia para desplazamientos en y; d) Campo de desplazamientos en y; e) Imagen de referencia para desplazamientos en z; f) Campo de desplazamientos en z. Fuente: Elaboración propia

Obteniéndose como resultados los recogidos en **Tabla 13** y **Tabla 14**.

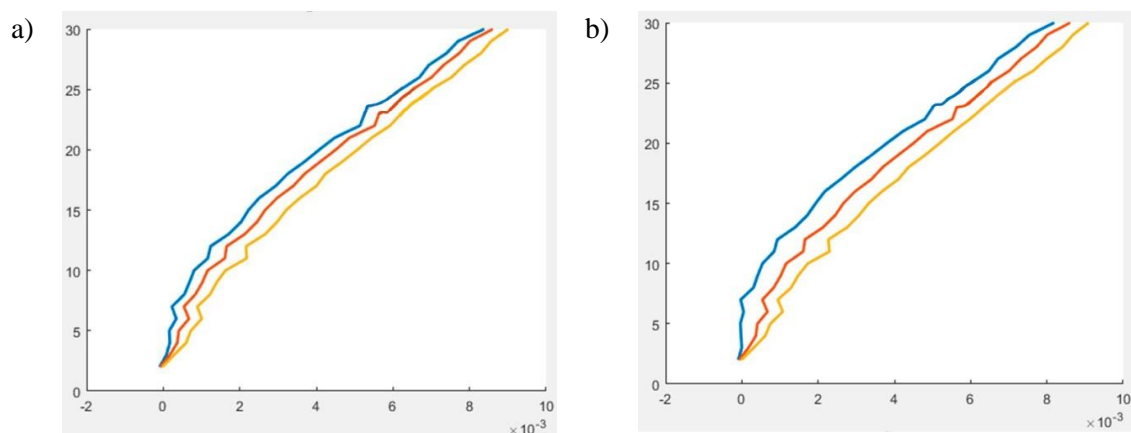
**Tabla 13.** Resultados obtenidos para probeta CC02

Desplazamiento máximo en y (mm)	2,6132
Deformación máxima en y	0.0174
Desplazamiento máximo en x (mm)	0.3241
Deformación máxima en x	0.0029
Poisson medio	0.16

**Tabla 14.** Resultados obtenidos para probeta CC03

Desplazamiento máximo en y (mm)	2,7021
Deformación máxima en y	0.0180
Desplazamiento máximo en x (mm)	0.1322
Deformación máxima en x	0.0012
Poisson medio	0.07

Directamente se obtienen las características principales. No obstante, se colocarán extensómetros virtuales de la misma manera que en la metodología DIC 2D. En cada una de las probetas el propio software ha descartado una fotografía en cada caso. Esto se debe a que en esas imágenes no ha sido capaz de hacer matching correctamente. No llega a ser un problema porque los resultados de los extensómetros virtuales en esta metodología vienen representados al igual que en la metodología 2D como una gráfica, pudiendo entrar en los resultados de Matlab© y encontrar el valor numérico asociado.



**Figura 46.** Resultados de los extensómetros virtuales a partir de la herramienta MultiDIC. a) Probeta CC02; b) probeta CC03. Fuente: Elaboración propia

## 5. Estudio comparativo de resultados

### a) Análisis de las variables mecánicas obtenidas por DIC-2D y DIC 3D

A fin de comprobar la diferencia entre una metodología y otra, a continuación, se van a comparar los resultados entre el DIC 2D y el DIC 3D.

**Tabla 15.** Comparación de las principales características mecánicas obtenidas a través del DIC 2D y del DIC 3D.

		DIC 2D	DIC 3D	Discrepancia
<b>Probeta CC02</b>	Deformación máxima en y	0.0102	0.0174	48,8%
	Deformación máxima en x	0.0030	0.0029	3,3%
	Módulo elástico (kN/mm <sup>2</sup> )	16004.4731	15942.1659	0,4%
	Coefficiente de Poisson	0.17	0.16	5,9%
<b>Probeta CC03</b>	Deformación máxima en y	0.0095	0.0180	47,2%
	Deformación máxima en x	0.0015	0.0012	20,0%
	Módulo elástico (kN/mm <sup>2</sup> )	15282.7169	15300.4979	0,1%
	Coefficiente de Poisson	0.17	0.07	58,8%

La deformación es la relación entre el desplazamiento y la longitud total de la probeta. El módulo elástico, o módulo de Young es la pendiente de la curva tensión-deformación y es uno de los principales definidores de un material, mide la fuerza necesaria para producir cierta deformación en el material. Finalmente, el coeficiente de Poisson es la relación entre las características longitudinales y las transversales.

Como puede observarse los resultados son muy similares entre metodologías. No obstante, en el coeficiente de Poisson de la probeta CC03 muestra más diferencia. Se va a comprobar si a nivel aplicación puede hacer que este resultado lleve a la conclusión de que la metodología 3D no pueda servir.

### b) Influencia de las discrepancias obtenidas a nivel numérico

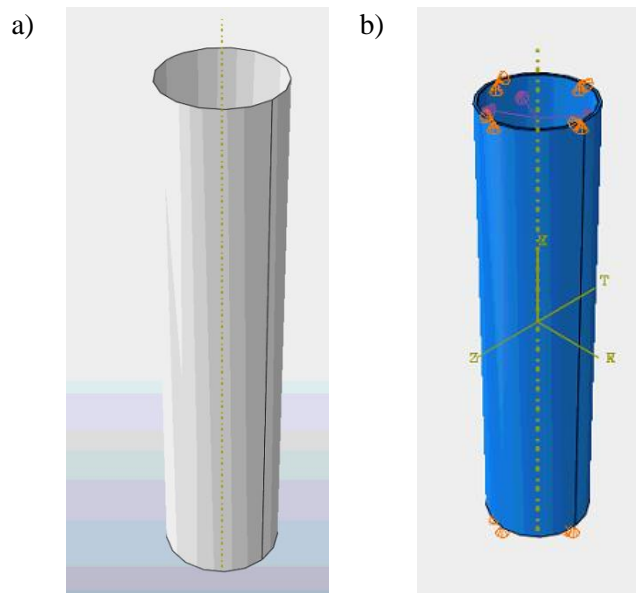
Atendiendo a los resultados obtenidos en la anterior sección, parece claro que ambos métodos proveen resultados diferentes unos de otros. Resultados que pueden tener cierta repercusión sobre los factores de seguridad obtenidos a través de simulaciones numéricas de diferentes soluciones industriales constituidas con dicho material. Atendiendo a ello, se procedió a realizar un estudio comparativo, en términos de factor de seguridad, entre un modelo industrial de una tubería con gas a presión con las siguientes etapas. i) definición del modelo numérico, ii) determinación del criterio de rotura, iii) simulación numérica.

#### Definición del modelo numérico

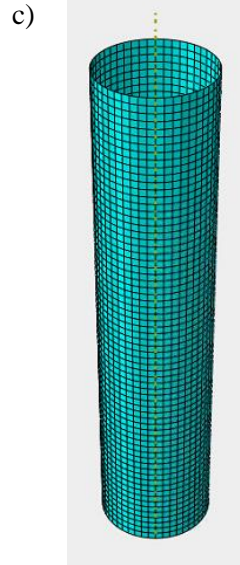
Para llevar a cabo el modelo numérico se ha utilizado el software Abaqus®. Este software utiliza el método de los elementos finitos para simular el comportamiento de

un modelo definido por el usuario. En este caso, como se ha comentado en la introducción, se ha definido un modelo de tubería a presión fabricado a partir del material caracterizado gracias a la metodología DIC. La geometría de dicha tubería es de 6 pulgadas, diámetro normalizado para tuberías de gas a presión, y una longitud de 700mm. La presión interna es una presión común de  $11,2 \text{ N/mm}^2$ . El modelo se compone de 15 capas superpuestas del material. El mallado se ha realizado con el tipo de malla SC6R, generando un total de más de 9000 nodos. Este trabajo se ha realizado a partir de un script programado en Python© que irá indicando al software FEM los pasos que debe realizar. De esta manera es más sencillo poder cambiar las propiedades del material. Los pasos que sigue dicho script, aunque se puede realizar perfectamente con el software Abaqus© secuencialmente son:

1. Generación de la geometría.
2. Creación del material.
3. Asignación del material a la geometría.
4. Configuración de las cargas.
5. Definición de la malla.
6. Generación de la malla sobre la geometría.







**Figura 47.** a) Geometría del modelo; b) Configuración de carga del modelo; c) Mallado del modelo. Fuente: Elaboración propia

### Determinación del criterio de rotura

En los materiales compuestos existe una variedad de criterios para poder calcular el fallo, desde el criterio Tsai-Hai hasta el criterio Tsai-Wu. En este caso se va a utilizar el criterio de Tsai-Wu ya que es uno de los más usados en la literatura actual (Tsai & Wu, 1971).

El criterio de rotura Tsai-Wu asume que el fallo del material compuesto ocurre cuando el índice de fallo (FI) “Failure Index” es mayor que 1. Este índice se calcula con la siguiente ecuación:

$$FI = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{31}\sigma_3\sigma_1 + F_{44}\sigma_4^2 + F_{55}\sigma_5^2 + F_{66}\sigma_6^2 \leq 1 \quad (3)$$

Donde:

$F_1 = \frac{1}{X_T - \frac{1}{X_c}}$	$F_2 = \frac{1}{Y_T - \frac{1}{Y_c}}$	$F_3 = \frac{1}{Z_T - \frac{1}{Z_c}}$
$F_{11} = \frac{1}{X_T X_c}$	$F_{22} = \frac{1}{Y_T Y_c}$	$F_{33} = \frac{1}{Z_T Z_c}$
$F_{44} = \frac{1}{S_{yz}^2}$	$F_{55} = \frac{1}{S_{zx}^2}$	$F_{66} = \frac{1}{S_{xy}^2}$
$F_{12} = \left(-\frac{1}{2}\right) \sqrt{F_{11} F_{22}}$	$F_{23} = \left(-\frac{1}{2}\right) \sqrt{F_{22} F_{33}}$	$F_{31} = \left(-\frac{1}{2}\right) \sqrt{F_{33} F_{11}}$

$X_T \equiv$  Carga de tracción

$X_c \equiv$  Carga de compresión

$Y_T \equiv$  Carga de tracción en la dirección transversal

$Z_T \equiv$  Carga de tracción en la dirección transversal

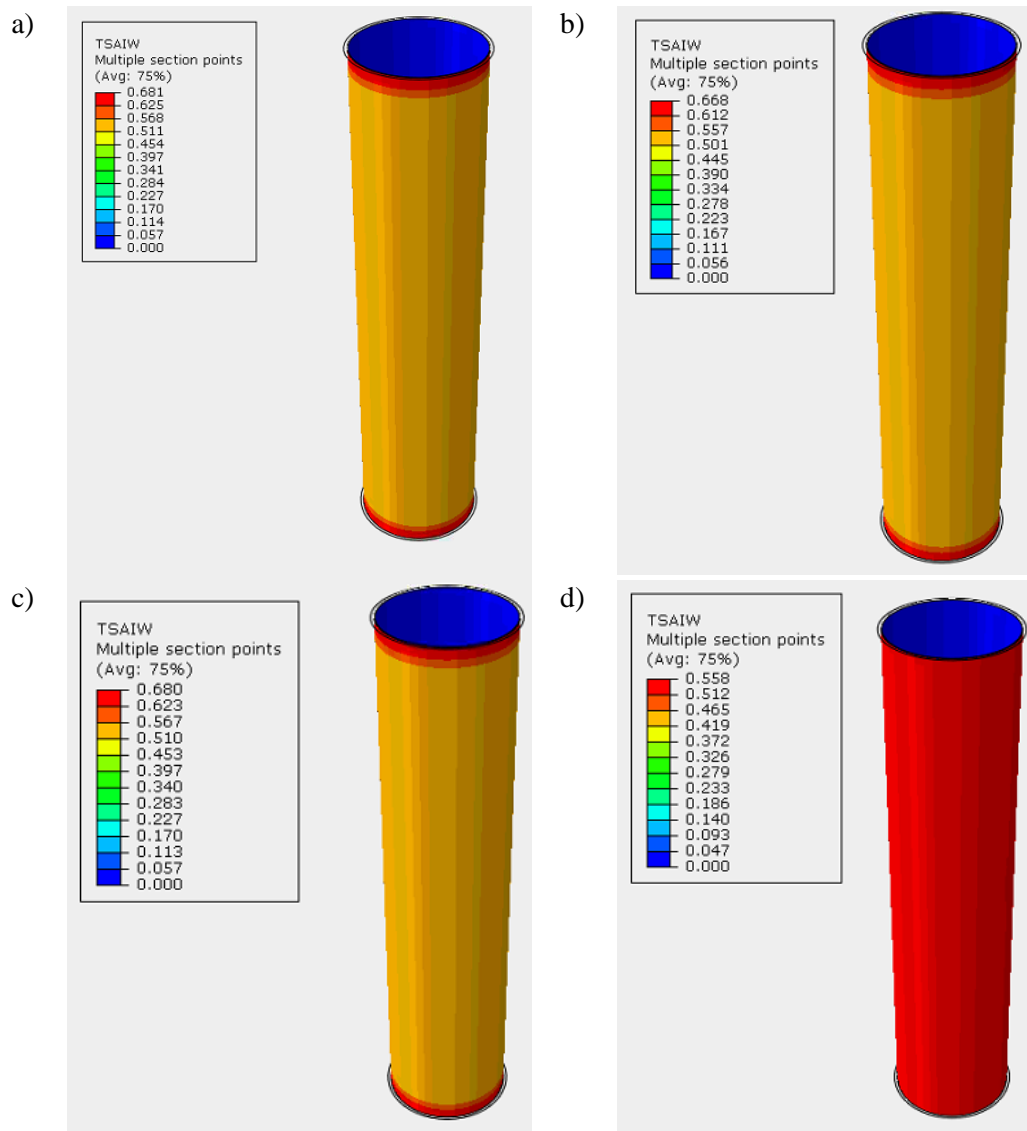
$Y_c \equiv$  Carga de compresión en la dirección transversal

$Z_c \equiv$  Carga de compresión en la dirección transversal

$S_{xy}; S_{yz}; S_{zx} \equiv$  Carga cortante en direcciones transversales

### Simulación numérica

Combinando el modelo con las características del propio material se realizó el análisis donde se obtenían los siguientes resultados en base al criterio TSAI WU recordando que el producto fallará cuando se supere la unidad al realizar los cálculos.



**Figura 48.** Resultados del modelo con las características obtenidas por los diferentes métodos DIC; Características obtenidas de a) probeta CC02 por método DIC 2D; b) probeta CC02 por método DIC 3D; c) probeta CC03 por método DIC 2D y; d) probeta CC03 por método DIC 3D. fuente: Elaboración propia.

### c) Discusión de resultados

Como ha podido observarse la metodología presentada genera un completo ciclo de diseño de producto. Los resultados llegan a ser muy similares entre las diferentes

técnicas usadas y tras una evaluación se puede observar como en la Tabla 15. Además tras una simulación numérica como la presentada ofrece resultados muy parecidos entre los diferentes modelos generados tal y como se observa en la Figura 48. El resultado discrepante obtenido en el coeficiente de Poisson de la probeta CC03 entre la metodología 2D y la metodología 3D se traduce en que, debido al propio significado de este parámetro, el comportamiento varía en cuanto a la concentración de zonas de conflicto. No obstante observando los resultados numéricos, aunque en el mapa de color parezca que existe una gran diferencia, la variabilidad del resultado Tsai-Wu es muy pequeño, por lo que realmente esa discrepancia no significa un error de diseño determinante.

## 6. Conclusiones y perspectivas futuras

El presente trabajo fin de master expone un estudio comparativo entre las dos tipologías de correlación digital existente a día de hoy como son el DIC 2D y el DIC 3D. Para ello se utiliza software de código abierto como es Ncorr para el caso del DIC 2D, aunque también se apoya en él el DIC 3D, y Multidic para el DIC 3D.

Los resultados arrojados por ambos enfoques muestran una alta similitud con discrepancias en algunas características mecánicas de hasta más del 50%, como puede ocurrir en el coeficiente de Poisson y del 40% en cuanto a la deformación en el eje y. A pesar de ello, el impacto en las simulaciones numéricas es muy pequeño.

Atendiendo a ello se puede concluir que la correlación digital de imágenes es un método no invasivo apto para la caracterización mecánica de composites. además, es posible obtener resultados mecánicos a través de equipos de bajo coste. En el caso del DIC 2D los costes son inferiores a la metodología 3D. No obstante, consiguiendo resultados similares, el campo de aplicación del método 3D es más amplio, pudiendo servir de validación de prototipos con geometrías que van más allá de la geometría plana en la que trabaja el método 2D.

Las perspectivas futuras de este trabajo son amplias. Lo ideal sería profundizar en esta metodología con el fin de poder validar modelos numéricos fiables y robustos, así como poder realizar una caracterización de materiales más completa y fiable. Sobre todo, de cara a que futuros desarrollos no sean tan complejos y este tipo de material se abra paso en el futuro de la industria.

## 7. Referencias

- Alamilla, J., Espinosa-Medina, M., & Sosa, E. (2009). Modelling steel corrosion damage in soil environment. *Corrosion Science*, 51(11), 2628-2638.
- Arellano, M. T., Crouzeix, L., Douchin, B., Collombet, F., Moreno, H. H., & Velázquez, J. G. (2010). Strain field measurement of filament-wound composites at  $\pm 55^\circ$  using digital image correlation: An approach for unit cells employing flat specimens. *Composite Structures*, 92(10), 2457-2464.
- Bing, P., Hui-Min, X., Bo-Qin, X., & Fu-Long, D. (2006). Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation. *Measurement Science and Technology*, 17(6), 1615.
- Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software. *Experimental Mechanics*, 55(6), 1105-1122.
- Caminero, M. A., Lopez-Pedrosa, M., Pinna, C., & Soutis, C. (2013). Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation. *Composites Part B: Engineering*, 53, 76-91.
- Colombo, C., & Vergani, L. (2018). Optimization of filament winding parameters for the design of a composite pipe. *Composites Part B: Engineering*, 148, 207-216.
- Comer, A., Katnam, K., Stanley, W., & Young, T. (2013). Characterising the behaviour of composite single lap bonded joints using digital image correlation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 40, 215-223.
- Chu, T., Ranson, W., & Sutton, M. A. (1985). Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 25(3), 232-244.
- Dong, Y., & Pan, B. (2017). A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 57(8), 1161-1181.
- Fraser, C. S. (1997). Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, 52(4), 149-159.
- García-Martin, R., Bautista-De Castro, Á., Sánchez-Aparicio, L. J., Fueyo, J. G., & Gonzalez-Aguilera, D. (2019). Combining digital image correlation and probabilistic approaches for the reliability analysis of composite pressure vessels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(1), 224-239.
- García-Martin, R., López-Rebollo, J., Sánchez-Aparicio, L. J., Fueyo, J. G., Pisonero, J., & González-Aguilera, D. (2020). Digital image correlation and reliability-based methods for the design and

- repair of pressure pipes through composite solutions. *Construction and building Materials*, 248, 118625.
- Hai, N. D., & Mutsuyoshi, H. (2012). Structural behavior of double-lap joints of steel splice plates bolted/bonded to pultruded hybrid CFRP/GFRP laminates. *Construction and building Materials*, 30, 347-359.
- He, T., Liu, L., & Makeev, A. (2018). Uncertainty analysis in composite material properties characterization using digital image correlation and finite element model updating. *Composite Structures*, 184, 337-351.
- He, Y., Makeev, A., & Shonkwiler, B. (2012). Characterization of nonlinear shear properties for composite materials using digital image correlation and finite element analysis. *Composites Science and Technology*, 73, 64-71.
- ISO, E. (1997a). 527-4. Plastics–determination of tensile properties–part 4: test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites. *International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland*.
- ISO, E. (1997b). 527-4. Determination of tensile properties–Part 4: test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites. European Standard. *International Organization for Standardization*.
- Laney, P. (2002). Use of composite pipe materials in the transportation of natural gas. *Idaho International Engineering and Environmental Laboratory, Bechtel BWXT Idaho, LLC*.
- Lara, M. C., Ríos, H. J., González, H. R., & Belman, E. O. Desarrollo de un cuadricóptero-mini basado en materiales compuestos.
- Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D., & Habraken, A. (2006). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and lasers in engineering*, 44(11), 1132-1145.
- Maclaughlin, T. F. (1968). A photoelastic analysis of fiber discontinuities in composite materials. *Journal of composite materials*, 2(1), 44-55.
- Mokhtari, M., & Nia, A. A. (2016). The application of CFRP to strengthen buried steel pipelines against subsurface explosion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 87, 52-62.
- Murienne, B. J., & Nguyen, T. D. (2016). A comparison of 2D and 3D digital image correlation for a membrane under inflation. *Optics and lasers in engineering*, 77, 92-99.

- Omairey, S. L., Dunning, P. D., & Sriramula, S. (2018). Influence of micro-scale uncertainties on the reliability of fibre-matrix composites. *Composite Structures*, 203, 204-216.
- Orell, O., Vuorinen, J., Jokinen, J., Kettunen, H., Hytönen, P., Turunen, J., & Kanerva, M. (2018). Characterization of elastic constants of anisotropic composites in compression using digital image correlation. *Composite Structures*, 185, 176-185.
- Pan, B., Lu, Z., & Xie, H. (2010). Mean intensity gradient: an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation. *Optics and lasers in engineering*, 48(4), 469-477.
- Pan, B., Qian, K., Xie, H., & Asundi, A. (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, 20(6), 062001.
- Rafiee, R. (2016). On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes: A review. *Composite Structures*, 143, 151-164.
- Reu, P. (2014a). All about speckles: aliasing. *Experimental Techniques*, 38(5), 1-3.
- Reu, P. (2014b). All about speckles: speckle size measurement. *Experimental Techniques*, 38(6), 1-2.
- Reu, P. (2015a). All about speckles: contrast. *Experimental Techniques*, 39(1), 1-2.
- Reu, P. (2015b). All about speckles: edge sharpness. *Experimental Techniques*, 39(2), 1-2.
- Seif, M. A., Khashaba, U. A., & Rojas-Oviedo, R. (2007). Measuring delamination in carbon/epoxy composites using a shadow moiré laser based imaging technique. *Composite Structures*, 79(1), 113-118.
- Sharifi, S., Gohari, S., Sharifiteshnizi, M., Alebrahim, R., Burvill, C., Yahya, Y., & Vrcelj, Z. (2018). Fracture of laminated woven GFRP composite pressure vessels under combined low-velocity impact and internal pressure. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4), 1715-1728.
- Sinclair, G., & Helms, J. (2015). A review of simple formulae for elastic hoop stresses in cylindrical and spherical pressure vessels: What can be used when. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 128, 1-7.
- Solav, D., Moerman, K. M., Jaeger, A. M., Genovese, K., & Herr, H. M. (2018). MultiDIC: An open-source toolbox for multi-view 3D digital image correlation. *IEEE Access*, 6, 30520-30535.



- Sun, C., & Vaidya, R. (1996). Prediction of composite properties from a representative volume element. *Composites Science and Technology*, 56(2), 171-179.
- Sutton, M. A., Orteu, J. J., & Schreier, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*: Springer Science & Business Media.
- Sutton, M. A., Yan, J. H., Tiwari, V., Schreier, H., & Orteu, J.-J. (2008). The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and lasers in engineering*, 46(10), 746-757.
- Tsai, S. W., & Wu, E. M. (1971). A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of composite materials*, 5(1), 58-80.
- Vo, M. N., Wang, Z., Luu, L., & Ma, J. (2011). Advanced geometric camera calibration for machine vision. *Optical Engineering*, 50(11), 110503.
- Xiao, Z., Liang, J., Yu, D., Tang, Z., & Asundi, A. (2010). An accurate stereo vision system using cross-shaped target self-calibration method based on photogrammetry. *Optics and lasers in engineering*, 48(12), 1252-1261.
- Yahaya, N., Noor, N. M., Othman, S. R., Sing, L. K., & Din, M. M. (2011). New technique for studying soil-corrosion of underground pipeline. *Journal of Applied Sciences*, 11(9), 1510-1518.
- Yao, X., Meng, L., Jin, J., & Yeh, H. (2005). Full-field deformation measurement of fiber composite pressure vessel using digital speckle correlation method. *Polymer Testing*, 24(2), 245-251.
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(11), 1330-1334.